

OHM *handbook* 2

# 电子

〔日〕 藤井信生 主编

实用手册



科学出版社 OHM社



TN01  
45

OHM handbook 2

# 电 子

## 实用手册

〔日〕藤井信生 主编  
王力衡 薛培鼎 译  
王友功 崔东印 校  
薛培鼎

北方工业大学图书馆



00490735

科学出版社 OHM 社

2001

HD4/13

**图字:01-2000-3595 号**

Original Japanese edition

Handy Book Denshi

by Nobuo Fujii

Copyright © 1996 by Nobuo Fujii

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2000

All rights reserved

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

**ハンディブック 電子**

藤井信生 オーム社 2000年第1版第6刷

**图书在版编目(CIP)数据**

电子实用手册〔日〕藤井信生主编;王力衡等译. —北京:科学出版社,2001  
(OMH 实用手册 2)

ISBN 7-03-009375-5

I. 电… II. ①藤… ②王… III. 电子技术-基本知识 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 26632 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

**科学出版社 OHM 社 出版**

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 8 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2001 年 8 月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—4 000 字数: 521 000

**定 价: 39.80 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 目 录

## 第1章 电磁与电路

1	电 流	2
2	电阻消耗电能	5
3	电流产生的磁场	7
4	电流受到的磁场力	11
5	电磁感应	15
6	自感与自感系数	17
7	互感与互感系数	19
8	线圈可储存磁能	21
9	静电与库仑定律	23
10	电场与电位	25
11	电容器的电容	27
12	电容器储存电能	29
13	直流电路的 $R$ 、 $L$ 、 $C$	31
14	交流电	35
15	交流电的复数表示法	39
16	交流电路的 $R$ 、 $L$ 、 $C$	41
17	谐振电器	45
18	基尔霍夫定律	47
19	戴维宁定理	49
20	电路的分布参数 $R$ 、 $L$ 、 $C$	52



21 过渡现象 .....	54
---------------	----

## 第2章 电子物性和电子器件

1 原子与电子 .....	60
2 原子的排列和结晶 .....	63
3 能级和能带 .....	65
4 晶体中的电子运动 .....	67
5 本征半导体及其性质 .....	69
6 p 型半导体及其性质 .....	71
7 n 型半导体及其性质 .....	73
8 二极管的结构及其工作原理 .....	76
9 二极管的特性和使用方法 .....	78
10 晶体管的基本构造 .....	80
11 晶体管的工作原理和静态特性 .....	82
12 实际晶体管 .....	86
13 FET 的结构 .....	88
14 结型 FET .....	90
15 MOS 型 FET .....	92
16 集成电路 .....	94
17 数字 IC 和模拟 IC .....	97
18 记忆元件 .....	99
19 半导体激光器 .....	101
20 约瑟夫逊元件 .....	104



## 第3章 模拟电子电路

1	放大的原理	108
2	基本放大电路	110
3	放大电路的动态特性	112
4	偏压电路(Ⅰ)	114
5	偏压电路(Ⅱ)	116
6	$h$ 参数和等效电路	118
7	小信号放大电路	122
8	负反馈放大电路	124
9	功率放大电路	128
10	高频放大电路	130
11	FET 放大电路	132
12	IC 化的放大器(Ⅰ)	134
13	IC 化的放大器(Ⅱ)	137
14	振荡的原理	143
15	LC 振荡电路	145
16	RC 振荡电路	147
17	晶体振荡电路	149
18	频率变换电路	151
19	调制电路	153
20	解调电路	156
21	直流稳压电源	158
22	开关电源	162



## 第4章 脉冲数字电路

1	脉冲波	166
2	开关电路	168
3	多谐振荡器	171
4	施密特触发电路	175
5	微分电路与积分电路	178
6	各种各样的整形电路	180
7	锯齿波的产生	182
8	脉冲放大电路	185
9	用 1 和 0 表示数字	187
10	二进制数和十进制数间的变换	189
11	二进制和十六进制间的变换	191
12	二进制小数的表示方法	193
13	二进制的加法和减法	195
14	数字 IC	197
15	逻辑电路基础	199
16	布尔代数	203
17	NAND 电路和 NOR 电路	208
18	基本逻辑电路的组合	210
19	半加器和全加器	212
20	编码器和译码器	214
21	触发器	216
22	寄存器	219
23	计数器及其原理	222
24	A-D、D-A 转换电路	224



25	脉冲调制解调电路	227
26	数字钟表的构造	230
27	锁相环与频率合成器	232

## 第5章 电子测量

1	测量与误差	238
2	仪表的分类与使用	240
3	动圈式仪表	243
4	数字万用表的结构	246
5	高频电流的性质与测量	249
6	电子电压表	252
7	数字频率计	255
8	信号发生器	257
9	示波器	259
10	X-Y 绘图机和 X-Y 记录仪	262
11	各种电桥	264
12	高频功率的测量	267
13	电场强度的测量	269
14	噪 声	272
15	传感器与生物体的检测	275
16	光的测量	278
17	频谱分析仪	280
18	FFT 分析仪	283
19	各种应用测量	286



第6章 信息技术

1	计算机结构	292
2	控制装置和算术逻辑运算装置	294
3	主存储装置	298
4	中央处理装置的基本工作	300
5	输入设备	302
6	输出设备	304
7	辅助(外部)存储部件	306
8	操作系统	308
9	程序语言和语言处理程序	310
10	流程图与程序	313
11	数据处理	318
12	文 件	320
13	个人计算机通信	323
14	计算机网络	325
15	模拟和数字转换	327

第7章 电子控制

1	什么是顺序控制	330
2	控制中所使用的开关动作	332
3	触点电路(电磁继电器)	334
4	无触点电路(半导体元器件)	336
5	顺序图	340



6	各种传感器开关	343
7	顺序控制器	345
8	自保电路	348
9	联锁电路	350
10	定时器电路	353
11	顺序控制	355
12	反馈控制	358
13	频率传递函数和阶跃响应	362
14	方块图	366
15	频率响应	369
16	控制的特性	373
17	响应的改善	376
18	计算机控制	379
19	接 口	381
20	外部设备的连接	383
21	机器人控制	385

## 第 8 章 通 信

1	电信的原理和系统	390
2	电话的构成和电话机	394
3	电话交换机的原理	398
4	通信线路的结构和种类	400
5	多路通信原理	402
6	光通信原理	404
7	电波的性质及传播方式	406
8	无线通信方式	409

9	发射机和接收机	412
10	天 线	415
11	微波通信	418
12	卫星通信	421
13	数据通信	424
14	数字信号的传输	427

## 第9章 声像设备

1	声音的性质与人的听觉	432
2	拾音器和扬声器	434
3	摄像管和固体摄像器件	436
4	显像管和液晶显示器	438
5	无线广播	442
6	电视原理	447
7	电视广播	452
8	高清晰度电视和高画质电视	455
9	卫星广播和 CATV	457
10	视频磁带录像机(VTR)	459
11	传 真	461
12	音频放大器	463
13	磁带录音机	465
14	数字记录原理与数字音频	468
15	计算机与多媒体	473
16	计算机图形学	475



## 第10章 各种电子技术应用系统

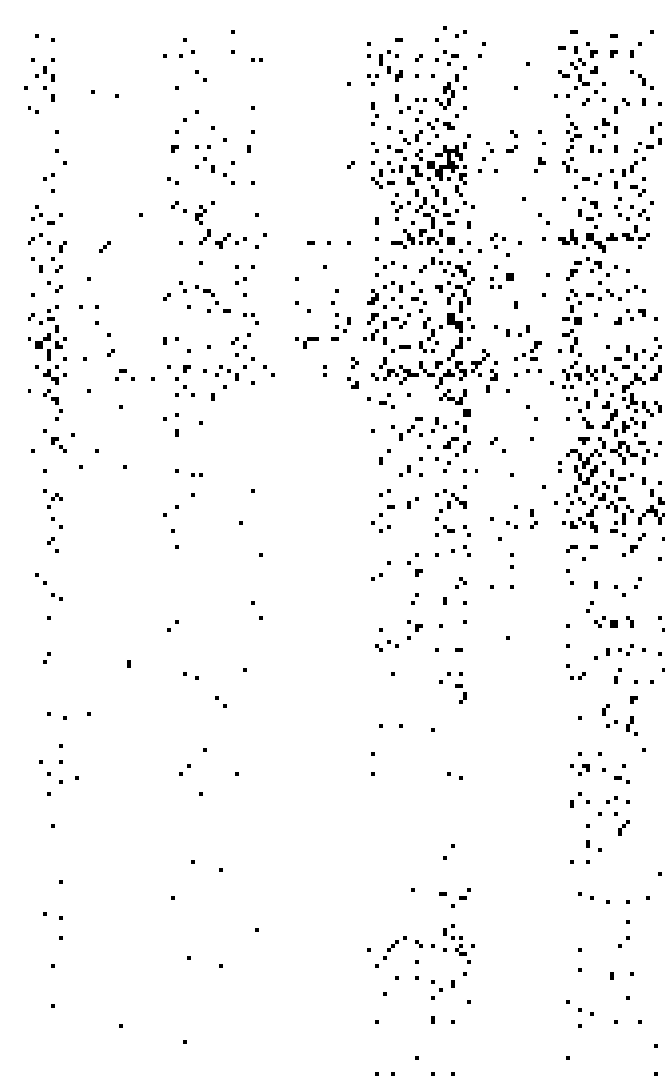
1 移动通信系统的构成 .....	480
2 ISDN 的构成 .....	483
3 多媒体通信 .....	486
4 激光加工 .....	488
5 电子显微镜 .....	491
6 列车运行控制和安全信号设备 .....	493
7 自动剪票和订座系统 .....	495
8 GPS 定位 .....	498
9 航空交通管制系统 .....	500
10 身体的检测 .....	503
11 X 光透视和 CT 诊断 .....	506
参考文献 .....	511
索 引 .....	515

### 篇外话

地磁与生物磁 .....	57
单晶体的培育与生长 .....	106
电子电路的仿真 .....	164
数字电路的仿真 .....	235
医学工程的最前沿 .....	289
数字信号处理器(DSP) .....	328
自行走机器人的程序 .....	387
工程承担者资格、扩频通信、毫米波通信、雷达 .....	430
CD-ROM、DCC、MD、MPEG .....	477
个人手提电话 .....	509

# 第1章

# 电磁与电路



公元前，人类就已具有了磁和静电的常识。经过长期的科学研究，发现了库仑定律和电磁感应现象等各种重要的定理和现象。作为基础，这些知识在现代电子工程中也是非常重要的。

另外，随着电气现象的研究，关于电路的研究也不断进步，为了分析电路创立了欧姆定律和基尔霍夫定律等重要法则。依据这些法则，使我们理解电路并定量分析成为可能。

因此，作为学习电子学的基础知识，在本章中就将就磁和静电的性质、电路的种类，以及计算方法加以说明。

- 责任编委  
山本义男
- 执 笔  
星野达哉



# 1 电 流

## □ 要 点

所谓电流就是“电荷的移动”。在金属中,则是带负电荷的电子的运动形成电流。电子从负极流向正极,但电流的方向规定为从正极流向负极。电流的大小定义为单位时间内流过的电荷量。

## □ 解 释 ● 电荷的流动

电荷

如图 1.1 所示,如果仔细观察,水流是水粒子(分子)运动所产生的。同样,电流也是由于带电粒子(电荷)的运动所引起的。电荷的定向运动就是电流。

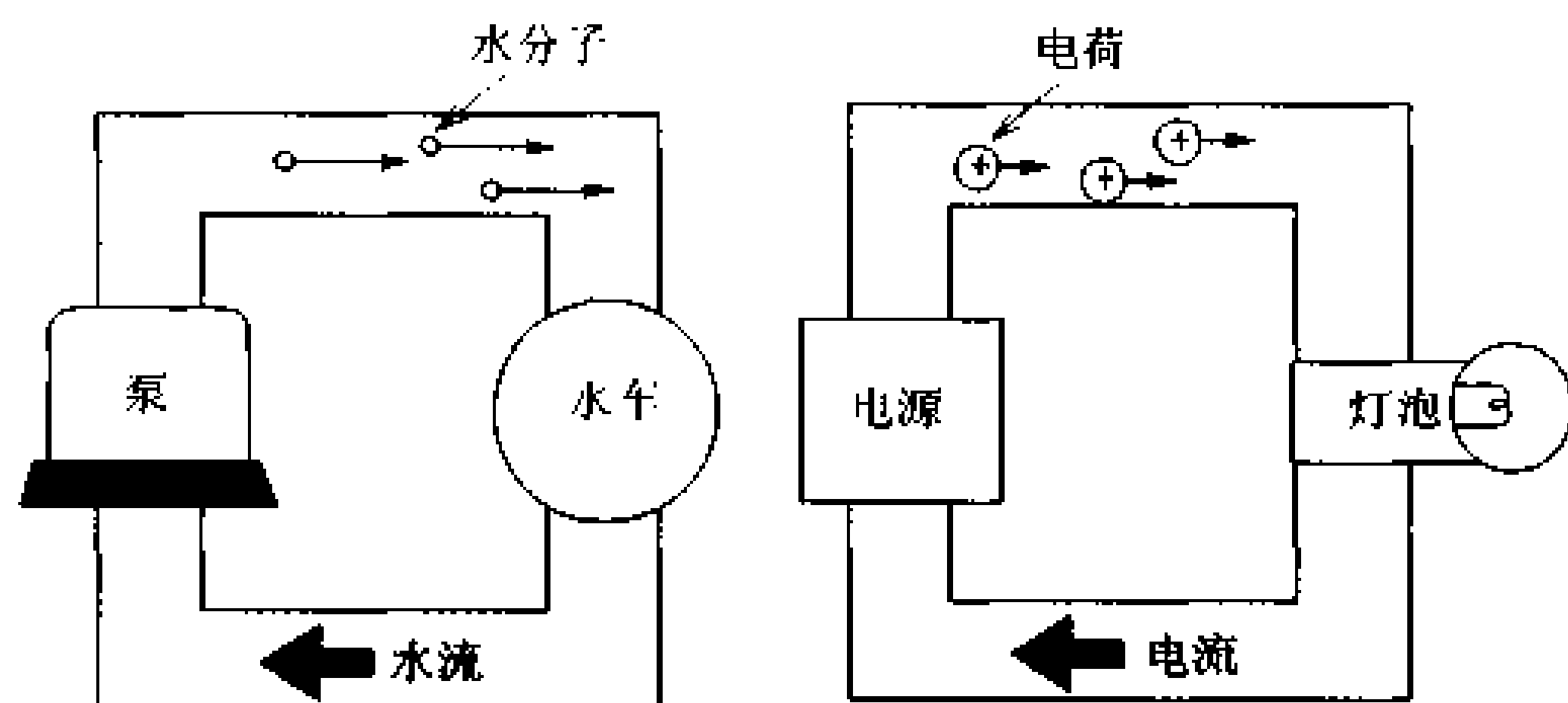


图 1.1 水流与电流

实际上,电荷就是构成物质的基本粒子。金属中的电子、电解液中的离子、半导体中的电子和空穴都是电荷,它们的定向运动形成电流(图 1.2)。

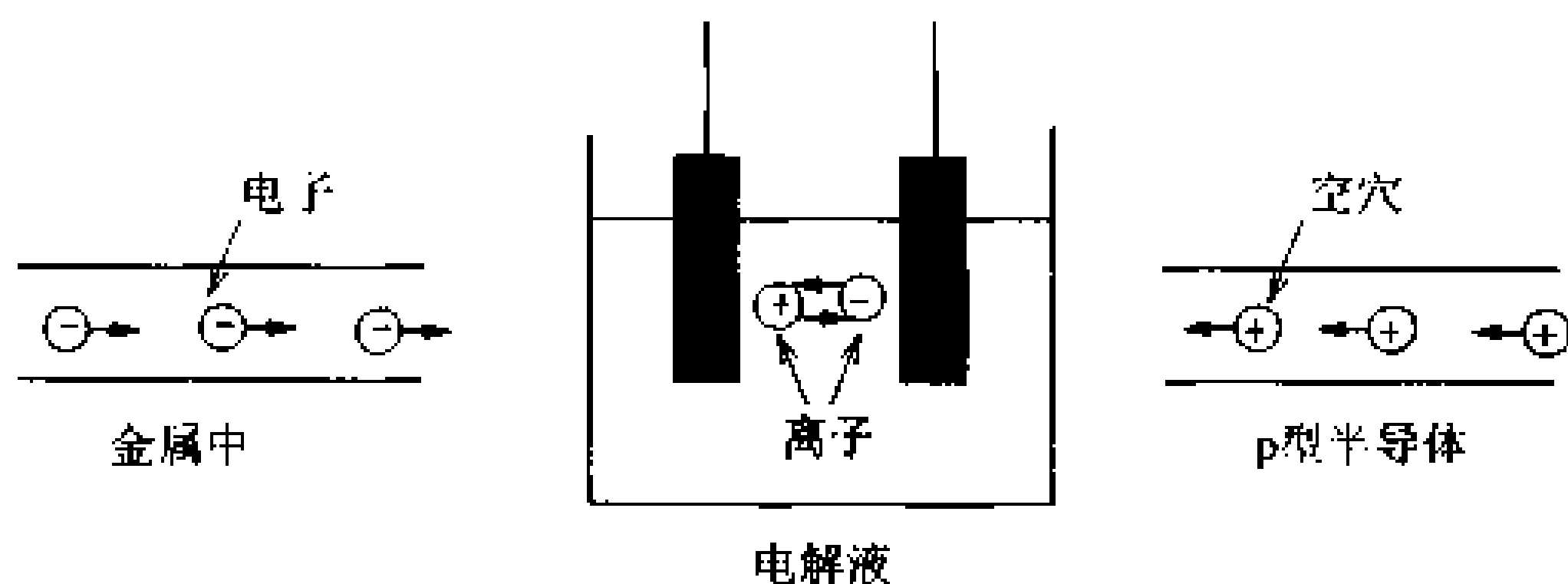


图 1.2 电荷的种类

### ● 电流的大小和方向

电流的大小可用每秒流过物体截面的电荷量表示,如果时间  $t[s]$  内流过的电荷量为  $Q[C]$ ,可用下式求得电流  $I[A]$  为

$$I = \frac{Q}{t} [A] \quad (1.1)$$

也就是说,如果  $1s$  内流过  $1C$  的电荷,电流为  $1A$ 。

电流的方向如图 1.3 所示,规定从正极流向负极。这样在金属等物体中,电流就和形成电流的电子运动方向相反。但是由于在电子发现之前,各种法则都是按照电流的方向从正极流向负极的规定考虑的,为避免混乱,于是就将与电子流相反的方向规定为电流的方向。

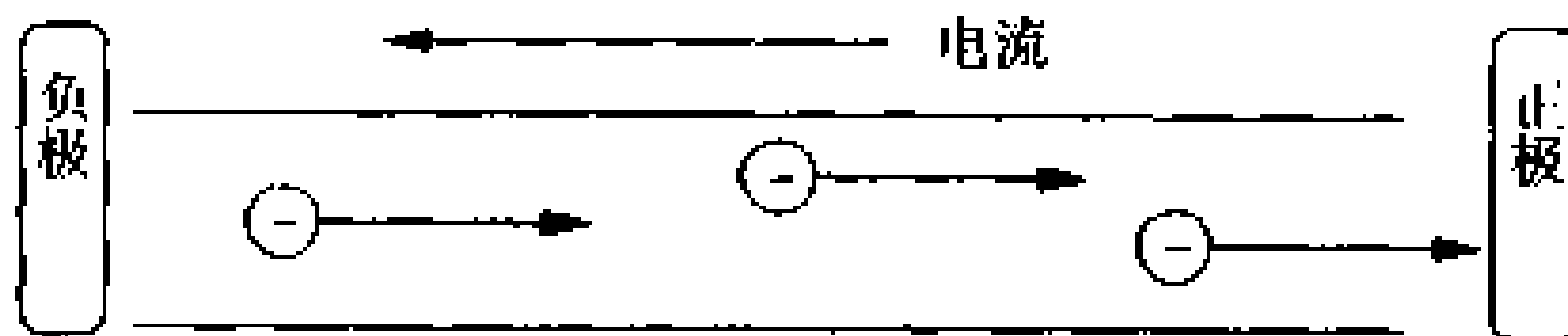


图 1.3 电子的运动与电流

### ● 电子的速度与电场的关系

电场

对电荷产生作用力的空间称为电场。作为荷电粒子的电子受电场力的作用产生运动,但由于它与导体的原子发生碰撞,其能量几乎全部损失。在电场强度不太高时,电子的运动速度  $v[m/s]$  与电场  $E[V/m]$  的大小成正比:

$$v = \mu E [m/s] \quad (1.2)$$

迁移率

式中  $\mu$  称为迁移率,它是由电子的质量和与原子的平均碰撞时间所决定的常数。

### ● 电流与电压成正比

电压

使物体流过电流的电压力称为电压。如果在导体两端加上电压其中就会形成电场,于是,物质中的电荷(电子)发生定向移动,产生电流。电场强度与所加电压的大小成正比,电场强度越大,电子的运动速度也越大。例如,在水压高、水流速大时,单位时间内从水龙头流出的水量就多。如图 1.4 所示,移动的电子的速度越大,每单位时间内通过物体截面的电子数就越多。所以,如果电压高,电流也与其成正比地增大。

流过每单位面积的电流大小称为电流密度  $J[A/m^2]$ 。设导体中每单位体积内的自由电子数为  $n$ ,则电流密度  $J$  可用下式表示:



$$J = nQv = nQ\mu E = \sigma E \quad [\text{A/m}^2] \quad (1.3)$$

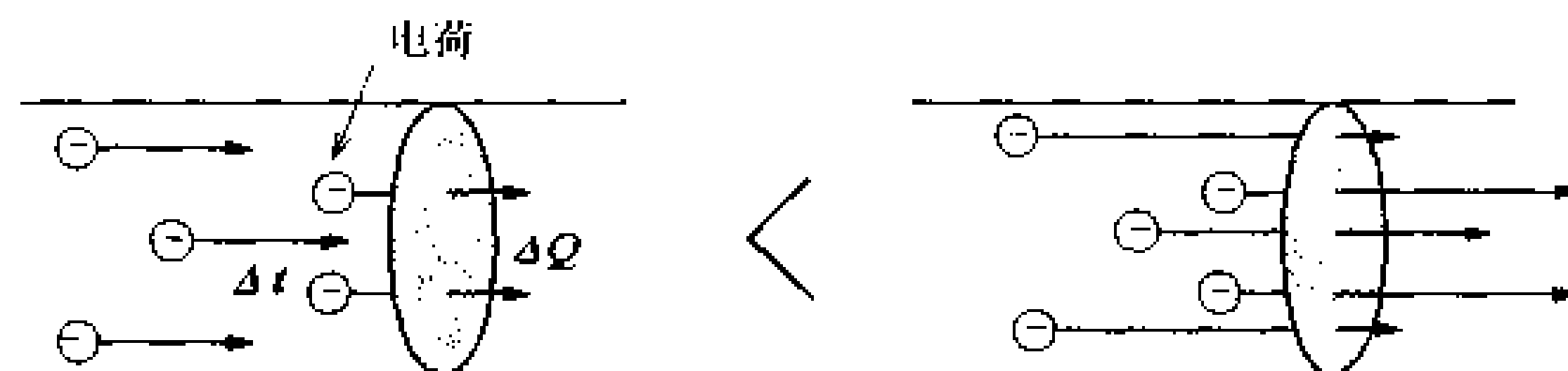


图 1.4 电荷的速度决定  $\Delta Q/\Delta t$

电导率

式中  $\sigma[\text{S/m}]$  称为电导率。电导率的大小决定于物质的种类和温度,电导率大的物质意味着单位体积中的自由电子数多。电导率的倒数称为电阻率  $\rho[\Omega \cdot \text{m}]$ 。

电阻率

### ● 电荷不灭定律

电荷决不会增加或减少。如图 1.5 所示,由于放电,所带电荷看似消失,这是由于正电荷和负电荷相互抵消(中和)所致,其本身决不会消失。

位移电流  
电磁波

在由直流这种恒定电流形成的闭合系统中,该定律可以比较简单地证明。但是在电场随时间变化、电荷的一部分流向另外系统的场合,为了验证电荷不灭定律,还必须考虑位移电流。由位移电流所产生的电场和磁场的波动即为电磁波。

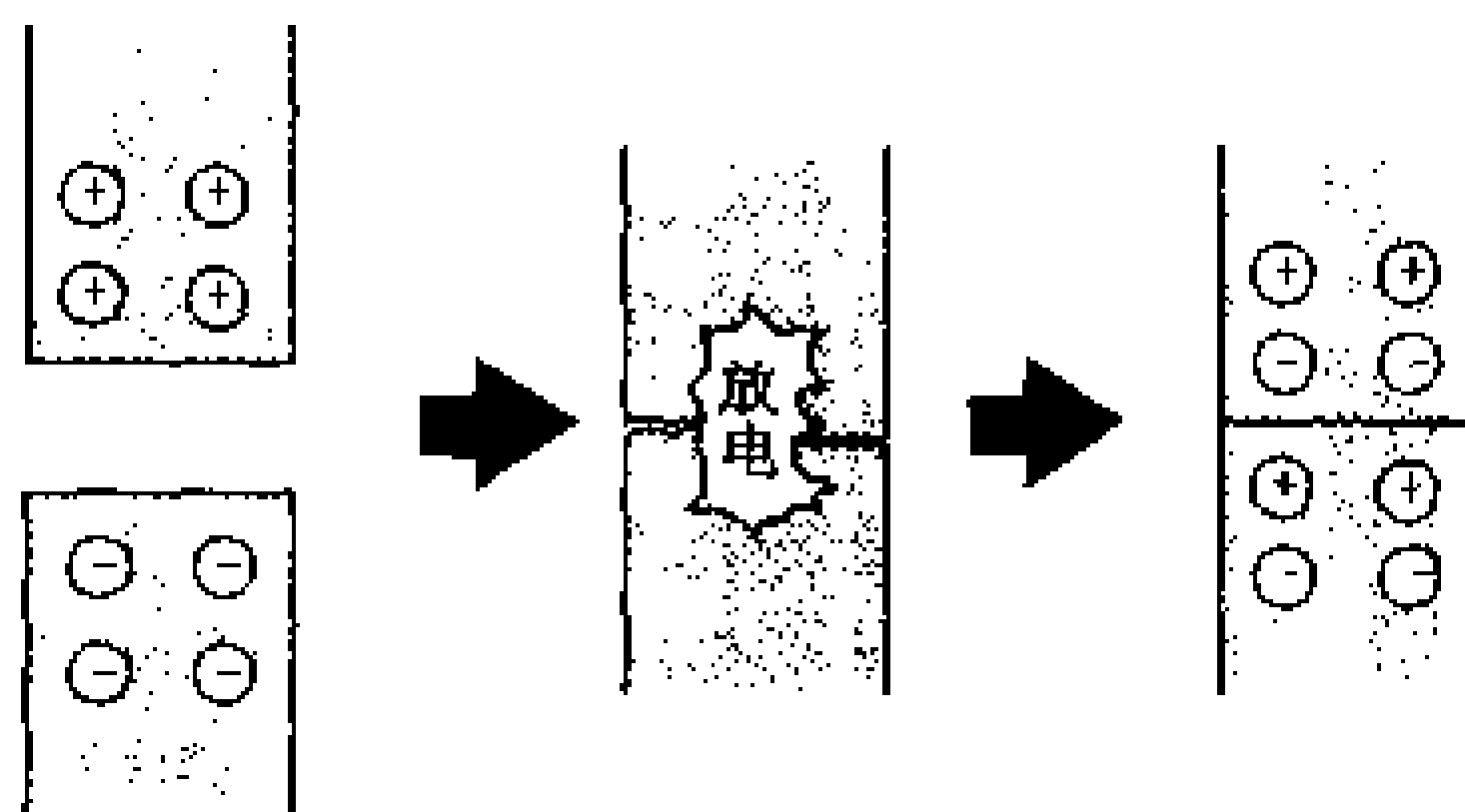


图 1.5 电荷的中和

## 2 电阻消耗电能

### □ 要点

如果使电流流过电阻,电阻就会发热,称为焦耳热。可用焦耳定律表示电流和发热量之间的关系。另外所消耗的电能称为功率。

### □ 解释

#### ● 焦耳定律

如图 1.6 所示,如果电流流过电阻,电子将与电阻中的原子发生碰撞。电子的动能大部分由于碰撞而变为热。这种热量称为焦耳热。

焦耳热

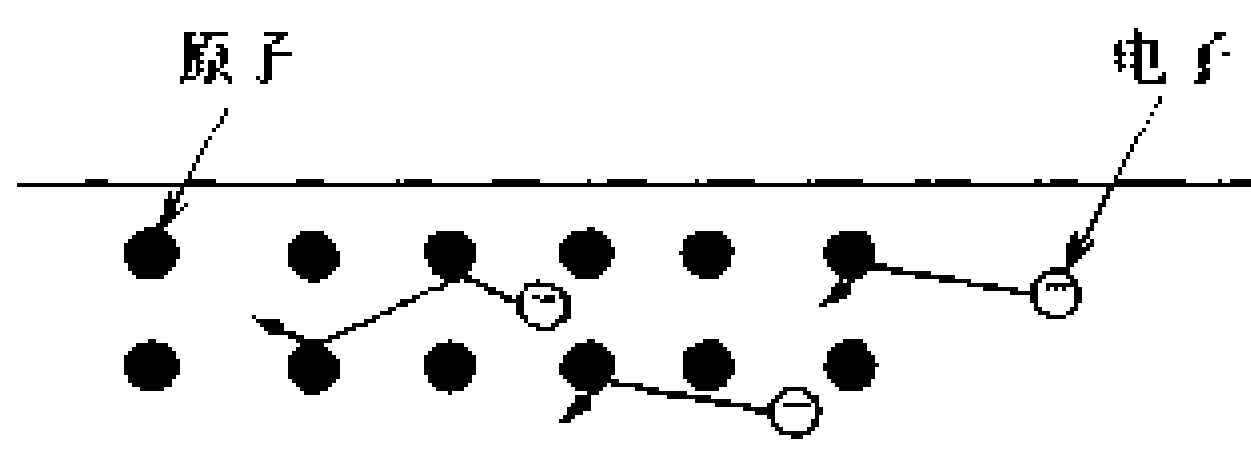


图 1.6 电阻中的电子运动

如第一节所述,由于电压  $V[V]$  在电阻中产生电场,所以电荷  $Q[C]$  运动就产生电流。因此电荷  $Q$  和电压  $V$  的积  $QV$  即为电荷从电场获得的势能。由于单位时间内流过的电荷量  $Q$  为电流  $I$ ,所以当施加电压  $V$  在时间  $t$  内流过电流  $I$  所产生的功率  $W$  即为:

$$W = IVt \text{ [J]} \quad (1.4)$$

焦耳根据导体中流过的电流能加热水的试验,确定了所增加的热量与电流的平方成正比,与时间  $t$  成正比的事实。这个规律称为焦耳定律:

$$W = RI^2t \text{ [J]} \quad (1.5)$$

该公式也可以从(1.4)式利用欧姆定律  $V=RI$  来获得。

#### ● 电能与做功

焦耳热也就是电能以热的形式所消耗的能量。1 秒钟所消耗的电能称为功率。在电阻上加电压  $V[V]$ ,流过电流  $I[A]$  时的功率  $P[W]$  可用下式表示:

$$P = I^2R = IV \text{ [W], [J/s]} \quad (1.6)$$

### □ 相关知识 ● 热量单位

热量的单位除使用焦[耳]外,还经常使用卡[cal]。1cal 的热量是在 1 大气压下将 1g 水加热升高  $1^\circ\text{C}$  所需要的热量。可用下

焦耳定律

欧姆定律



式进行换算:

$$1\text{J}=0.24\text{ cal} \quad (1.7)$$

### ● 最大功率输出

图 1.7 所示的电路中,电源  $E$  产生电能,负载  $R$  消耗电能,如果把(1.6)式改写为

$$P=\frac{V^2}{R} [\text{W}] \quad (1.8)$$

就可知道,要让电源给负载提供更大的功率,负载电阻  $R$  越小越

好。但是,实际电路中并非如此,这是由于电源本身电阻(称为内电阻)的影响所致。为使电源对负载提供最大功率,必须使负载电阻和内电阻相等。

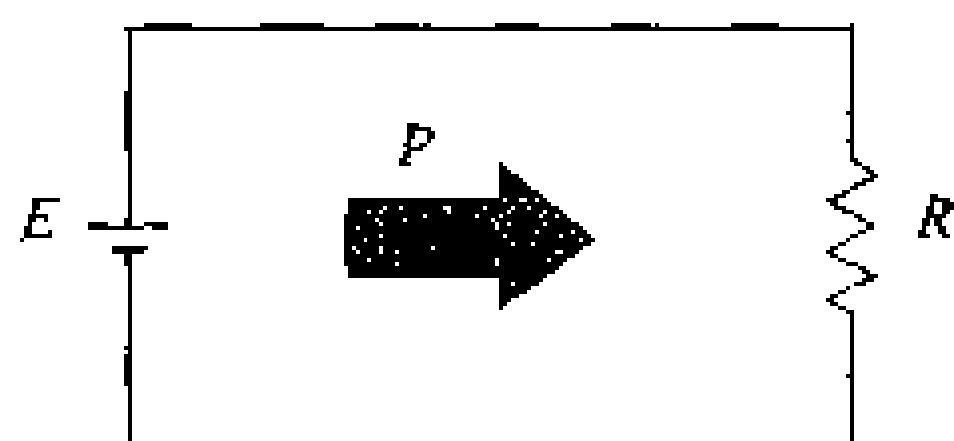


图 1.7 电源与负载电路

内电阻

### ■ 例 题 1.2.2 电能

今有额定值为  $100\text{V}$ 、 $40\text{W}$  和  $100\text{V}$ 、 $60\text{W}$  的两只灯泡,如果串联后两端加  $200\text{V}$  的电压,求每个灯泡所消耗的电能是多少?

**答** 从(1.8)式分别求得灯泡的电阻为

$$\frac{100^2}{40}=250\Omega, \quad \frac{100^2}{60}=\frac{500}{3}\Omega$$

如串联后加  $200\text{V}$  电压,通过的电流为

$$I=\frac{200}{250+500/3}=0.48\text{A}$$

从(1.6)式可得

$$40\text{W 灯泡} \quad P=0.48^2 \times 250=57.6\text{ W}$$

$$60\text{W 灯泡} \quad P=0.48^2 \times \frac{500}{3}=38.4\text{ W}$$

### 3 电流产生的磁场

□ 要 点

如果导体或线圈流过电流，其周围就会产生磁场。磁场的强度决定于电流的大小、距导体的距离以及线圈的匝数。

□ 解 释

● 电流与磁场的关系

如果电流流过图 1.8 所示的导体，从磁针的方向和铁粉的排列可知导体的周围产生了磁场。这表示电流产生了与磁铁相似的力。如第一节所述，电流是自由电子的作用产生的，所以，电子的状态与磁力有密切关系。

安培右螺旋定律

电流所产生磁场的方向如图 1.8 所示，电流与磁场的方向分别对应于右螺旋的转动方向与前进方向。称之为安培右螺旋定律。

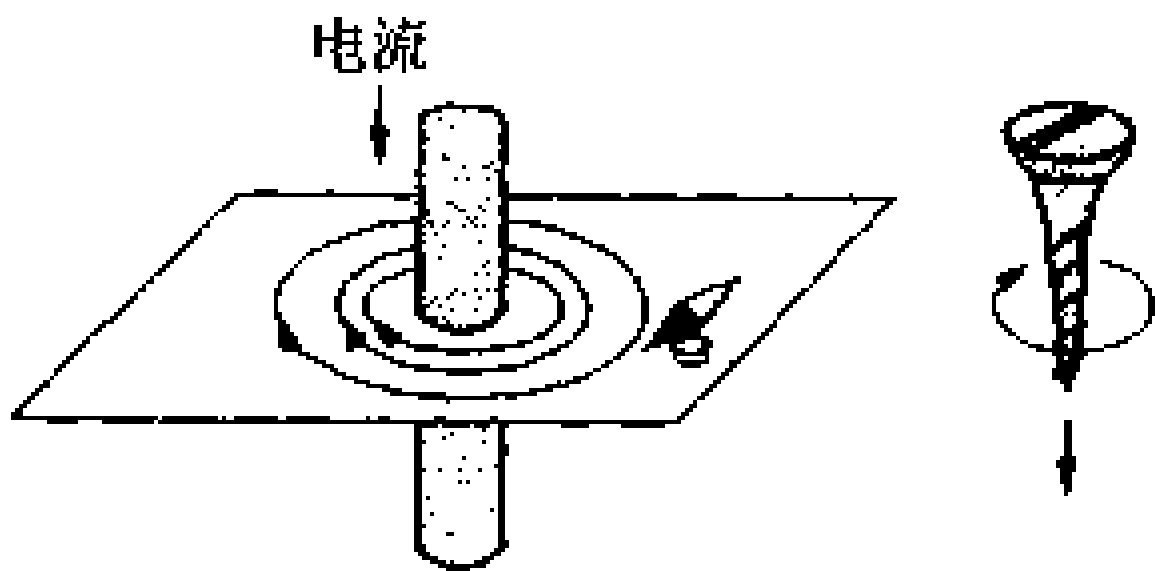


图 1.8 电流产生的磁场

● 毕奥-沙伐定律

如图 1.9 所示，导线上流过的电流  $I$  在其外部的  $P$  点所产生的磁场强度，可以用导线上某点的微小长度  $\Delta l$  所产生的磁场强度  $\Delta H$  叠加求得。 $\Delta H$  可用下式表示：

$$\Delta H = \frac{I \Delta l \sin \theta}{4 \pi r^2} \text{ [A/m]} \quad (1.9)$$

毕奥-沙伐定律

这就是毕奥-沙伐定律。

● 安培环路定律

如图 1.10 所示，如果当长度  $l$  的闭合电路围成一周时，对磁场强度  $H$  [A/m] 沿该环进行积分，则结果与穿过该环的电流  $I$  成正比。这称为安培环路定律。

安培环路定律

$$Hl = I \text{ [A]} \quad (1.10)$$

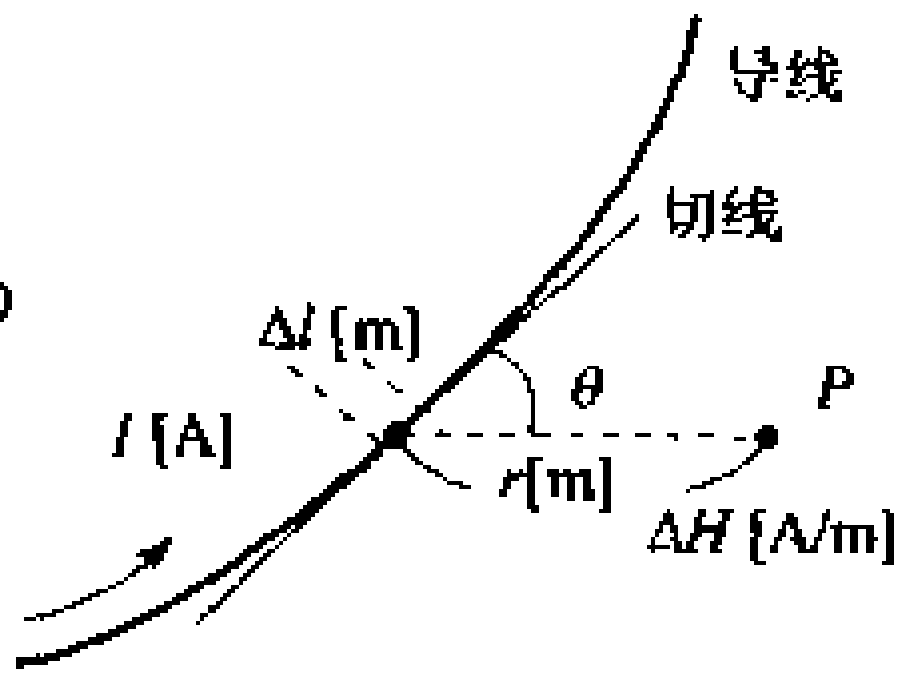


图 1.9 毕奥-沙伐定律

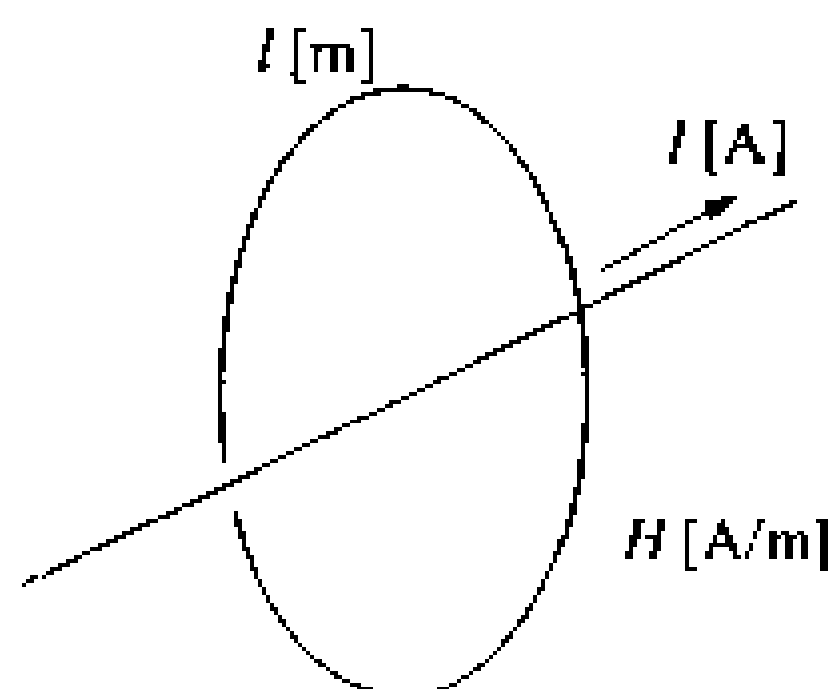


图 1.10 安培环路定律

### ● 直线电流的磁场

如图 1.11 所示, 流过直线导体的电流所产生的磁场是以导体为中心的圆。如果圆周上某点到导体的距离即半径为  $r$  [m], 则该点的磁场强度为  $H$  [A/m], 根据安培环路定律,

$$H \times 2\pi r = I \text{ [A]}$$

因而, 磁场强度  $H$  可用下式求得

$$H = \frac{I}{2\pi r} \text{ [A/m]} \quad (1.11)$$

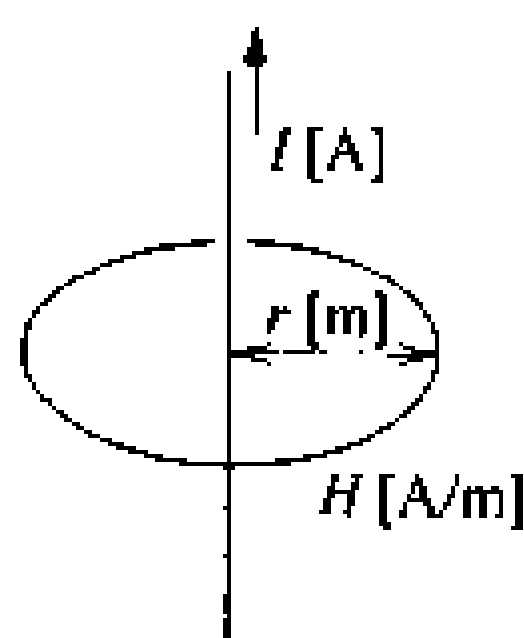


图 1.11 直线电流的磁场

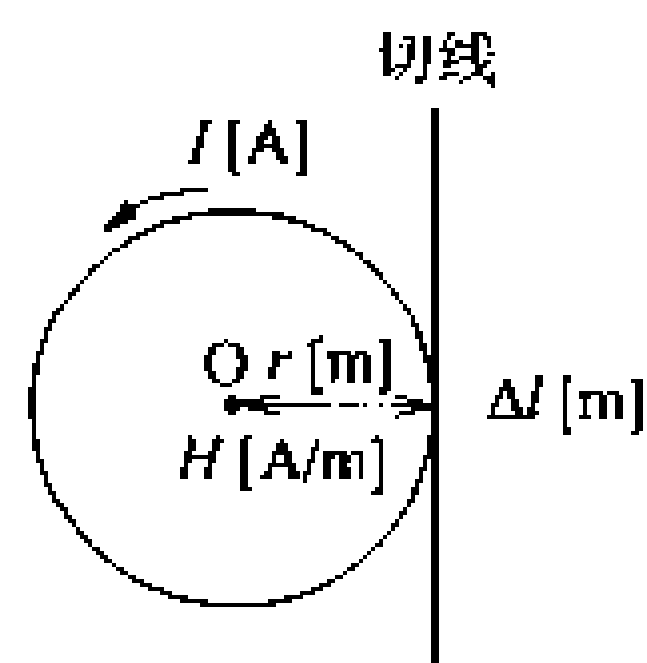


图 1.12 环电流产生的磁场

### ● 圆电流产生的磁场

如图 1.12 所示, 流过圆形线圈的电流在线圈中心  $O$  点所产生的磁场强度, 可利用毕奥-沙伐定律求得。在 (1.9) 式中  $\Delta l$  为  $2\pi r$ ,  $\sin\theta$  为  $\sin(\pi/2) = 1$ , 所以

$$H = \frac{1}{2r} \text{ [A/m]} \quad (1.12)$$

### ● 环形线圈产生的磁场

在图 1.13 所示截面的圆环状线圈中, 设环的平均半径为  $r$  [m], 流过线圈的电流为  $I$  [A], 线圈的匝数为  $N$ , 根据安培环路定律得

$$H \times 2\pi r = I \times N$$



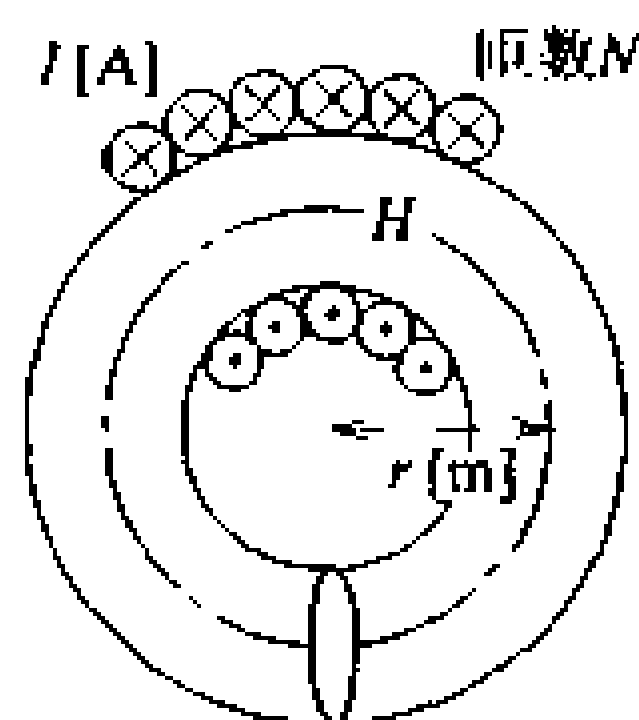


图 1.13 环形线圈内部的磁场

所以线圈内部的磁场强度  $H[\text{A/m}]$  如下:

$$H = \frac{IN}{2\pi r} [\text{A/m}] \quad (1.13)$$

### ● 圆筒形线圈的磁场

如果把图 1.14 所示的无限长圆筒线圈看作图 1.13 的线圈, 其半径为无限大, 则可以等同于环状线圈来处理。所以, 在(1.13)式中  $N/2\pi r$  为每米线圈的匝数, 设匝数为  $n$ , 则无限长圆筒线圈的磁场强度  $H[\text{A/m}]$  为

$$H = I \times n [\text{A/m}] \quad (1.14)$$

在有限长圆筒线圈的情况下, 线圈内部的磁通是不均匀的, 但如果与线圈的直径相比足够大时, 也可以等同于无限长圆筒线圈来处理。

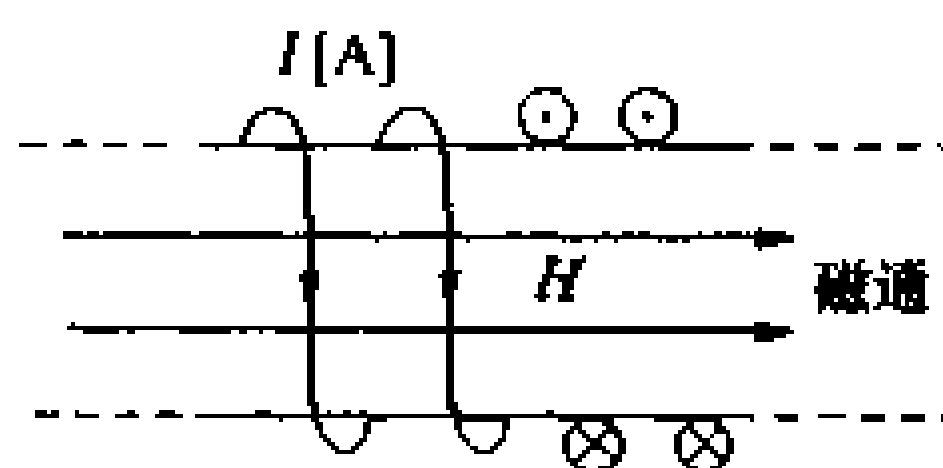


图 1.14 无限长圆筒线圈的磁场

## □ 相关知识 ● 磁场和磁通密度

磁通

磁通密度

如图 1.15 所示, 为说明磁场大小和方向所确定的量称为磁通  $\Phi[\text{Wb}]$ , 通过与磁场垂直的单位面积  $[\text{m}^2]$  的磁通量称为磁通密度  $B[\text{T}]$ , 用以表示磁感应强度。

### ● 磁导率

在某些场合, 如果设磁场强度为  $H[\text{A/m}]$ , 这时的磁通密度  $B$  即为

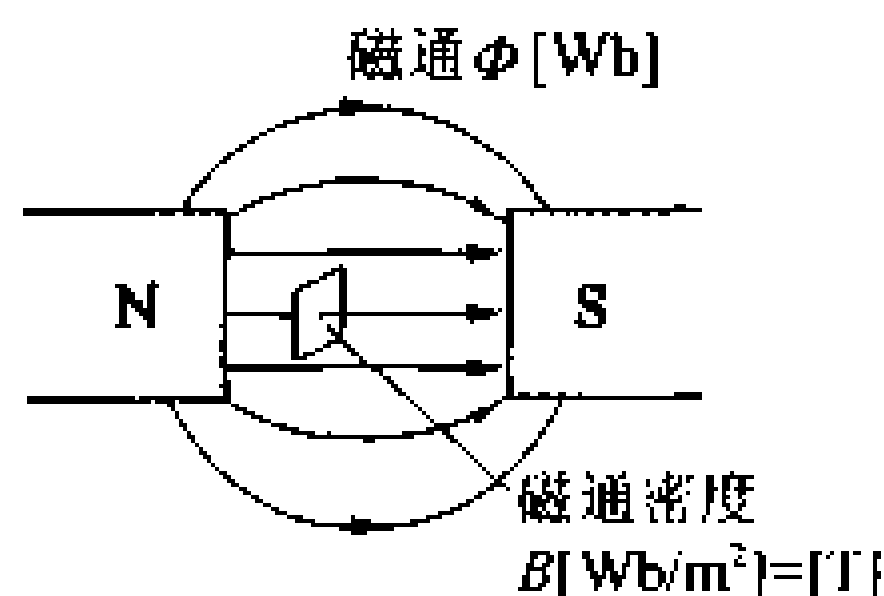


图 1.15 磁 通

$$B = \mu H \text{ [T]} \quad (1.15)$$

磁导率

式中  $\mu$  称为磁导率。它表示磁场通过的难易程度。

真空中的磁导率为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]} \quad (1.16)$$

相对磁导率

另外,将某物质的磁导率  $\mu$  与真空中的相比时,表示其比率的参数称为相对磁导率  $\mu_r$ ,可用下式表示:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.17)$$

### ■ 例 题 直线电流的磁场

距无限长直导线 1 米处某点的磁场强度为  $0.16 \text{ [A/m]}$ ,求流过导体的电流为多少?

**答** 根据安培环路定律

$$I = H \times 2\pi r = 0.16 \times 2\pi \times 1 = 1 \text{ A}$$

# 4 电流受到的磁场力

## □ 要点

电荷在磁场中运动,会受到力的作用。也就是说,磁场中的导体如果有电流流过,则会有力作用于导体,称为电磁力。用弗莱明左手定则可以知道电磁力的作用方向。如果磁通密度为  $B[\text{T}]$ 、电流为  $I[\text{A}]$ 、导体在磁场中的长度为  $l[\text{m}]$ 、导体与磁场的夹角为  $\theta$ ,则电磁力  $F[\text{N}]$  为

$$F = BIl\sin\theta \quad [\text{N}]$$

## □ 解释 ● 直线电流所受的力

电磁力

如图 1.16 所示,在磁极之间(磁场中)悬挂一个导体,如果有电流流过导体,导体就会产生运动。这是由于磁极的磁场和电流形成的磁场间相互作用所致,这个力称为电磁力。

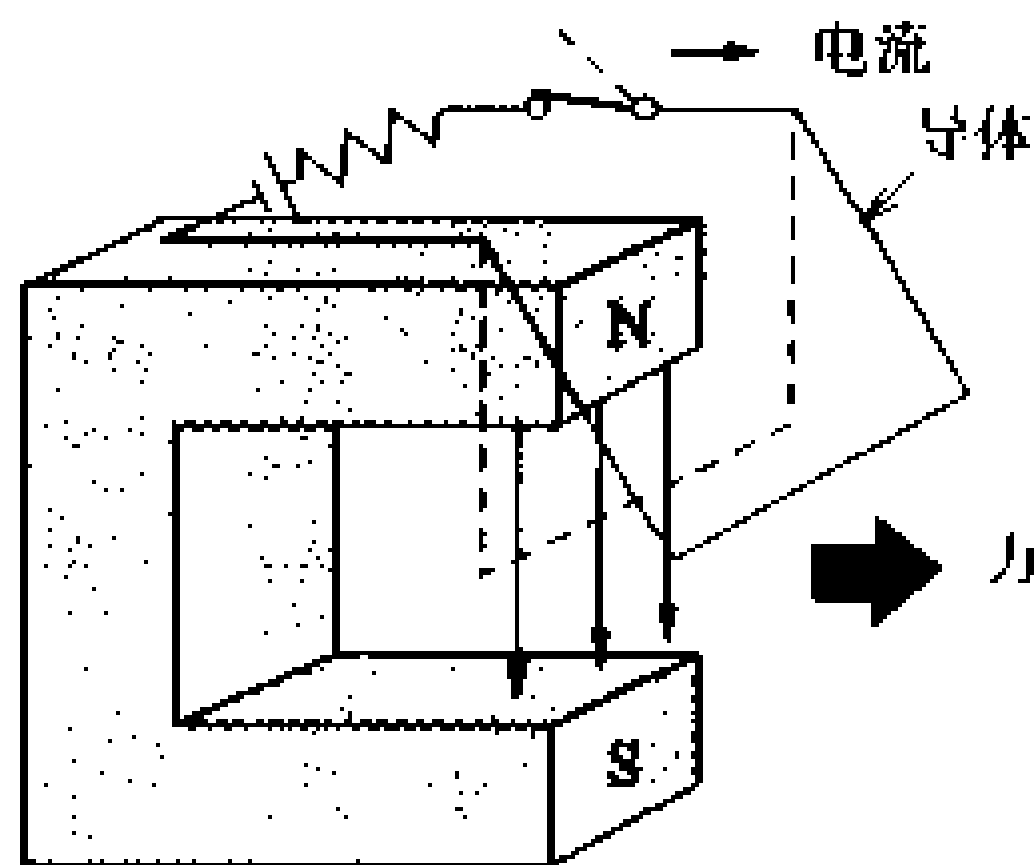


图 1.16 磁场中电流的受力

## ● 弗莱明左手定则

弗莱明左手定则

电磁力的作用方向取决于磁场方向和电流方向,用弗莱明左手定则可以知道它们之间的关系。如图 1.17 所示,用互成直角的左手的三个手指,食指为磁场方向,中指为电流方向,母指即为作用力的方向。

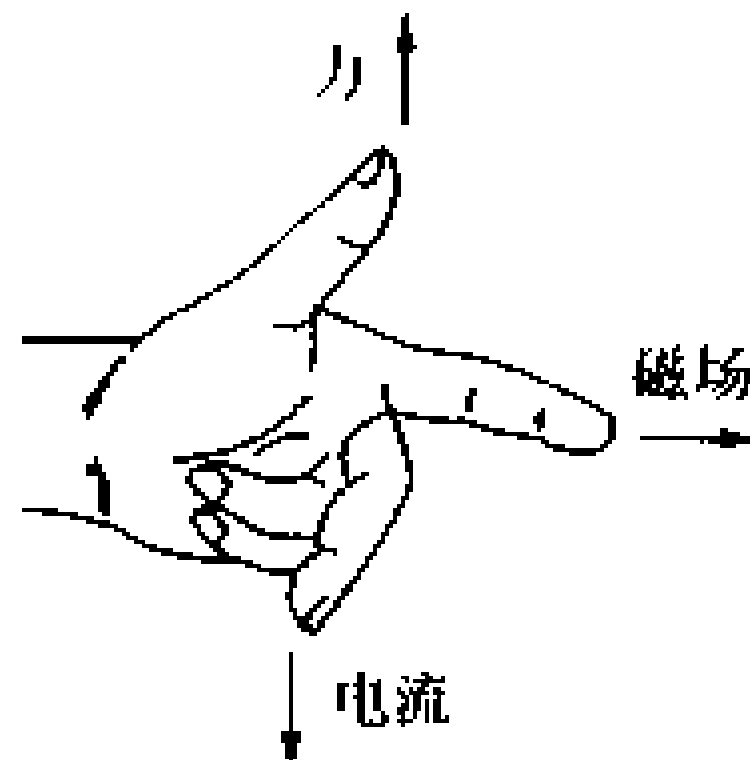


图 1.17 弗莱明左手定则

## ● 洛伦兹力

洛伦兹力

磁场中有电荷移动(电流)时,电荷受到的力称为洛伦兹力。如图 1.18 所示,在磁通密度为  $B[\text{T}]$  的磁场中,



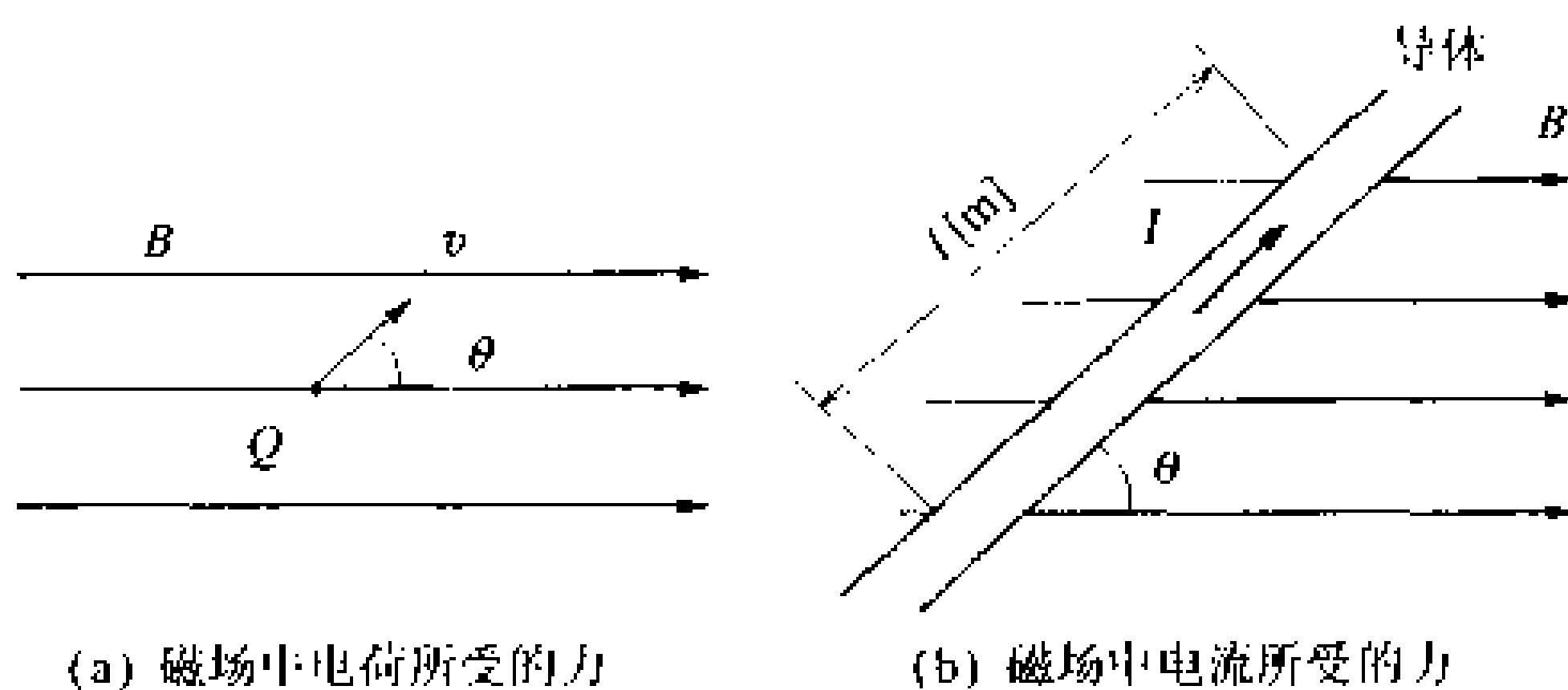


图 1.18 洛伦兹力

电荷  $Q[\text{C}]$  以速度  $v[\text{m/s}]$  运动时, 作用于电荷的力可用下式表示:

$$F = BQv \sin \theta \quad [\text{N}] \quad (1.18)$$

这里由于  $Qv$  是移动的电荷密度, 也就是电流密度。所以如图 1.18(b) 所示, 导体与磁通夹角为  $\theta$ , 由于电流  $I[\text{A}]$  流过磁场中长度为  $l[\text{m}]$  的导体, 故所受到的作用力为

$$F = BIl \sin \theta \quad [\text{N}] \quad (1.19)$$

### ● 电流单位的定义

如图 1.19 所示, 电流流过平行放置的导体时, 由于电流产生的磁场, 使导体相互之间受到力的作用。如果流过导体的电流方向相同, 导体之间将产生吸引力。电流方向相反时, 则相互排斥。

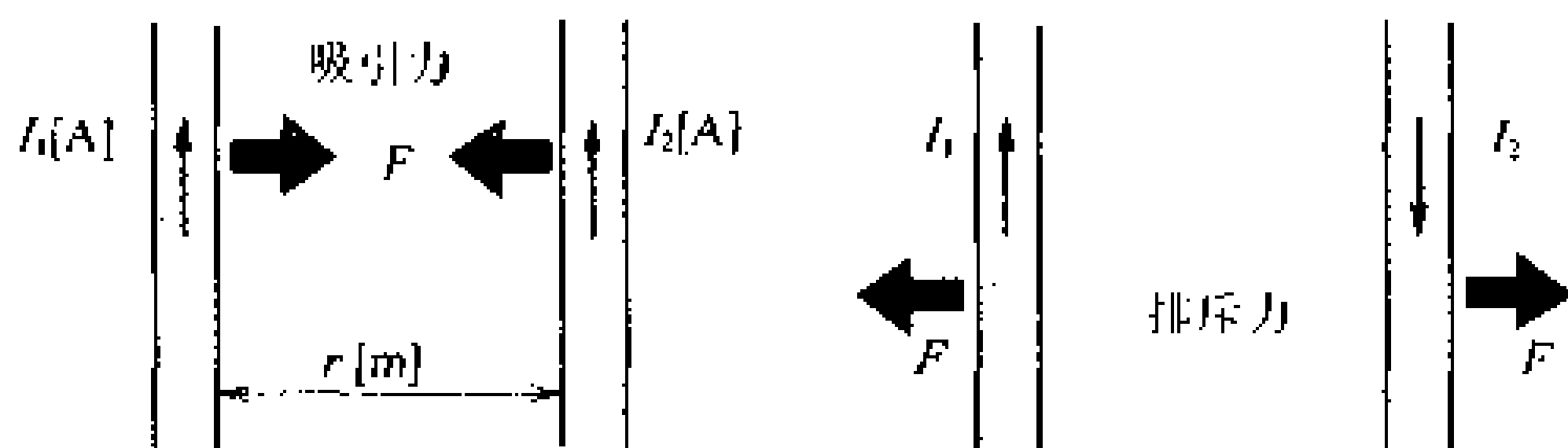


图 1.19 平行导体的受力

从 1.3 节可知, 在距直线电流  $I_1$  距离为  $r$  的点上, 电流  $I_1[\text{A}]$  所产生的磁场强度  $H[\text{A/m}]$  为

$$H = \frac{I_1}{2\pi r} \quad [\text{A/m}]$$

由于空气中磁场的磁通密度  $B[\text{T}]$  为

$$B = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} H \quad [\text{T}] \quad (1.20)$$

所以流过电流  $I_2$  的导体, 每米导体所受到的力为

磁场强度

$$F = BI_2 l = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{I_1}{2\pi r} \times I_2$$

$$= \frac{2I_1 I_2}{r} \times 10^{-7} \text{ [N]} \quad (1.21)$$

如果设  $r=1\text{m}$ , 二个导体流过的电流  $I_1$ 、 $I_2$  相等, 则有:

$$F = 2I^2 \times 10^{-7} \text{ [N]} \quad (1.22)$$

这样, 电流的单位可以定义为: 在空气中(真空中)相隔 1 米平行放置的二直线导体流过相等的电流时, 每米导体受到  $2 \times 10^{-7} \text{ [N]}$  作用力时的电流大小为 1A。

### ● 方形线圈的转矩

如图 1.20(a)所示, 在均匀磁通密度  $B \text{ [T]}$  的磁场中放置边长为  $a \text{ [m]}$ 、 $b \text{ [m]}$  的矩形线圈, 流过电流  $I \text{ [A]}$  时线圈受到的作用力  $F$  为

$$F = BIa \text{ [N]}$$

因而, 如图 1.20(b)所示, 磁通方向与线圈平面的夹角为  $\theta$  时, 线圈的转矩  $T \text{ [N} \cdot \text{m]}$  即为

$$T = 2 \times F \times \frac{b \cos \theta}{2}$$

$$= B I a b \cos \theta \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (1.23)$$

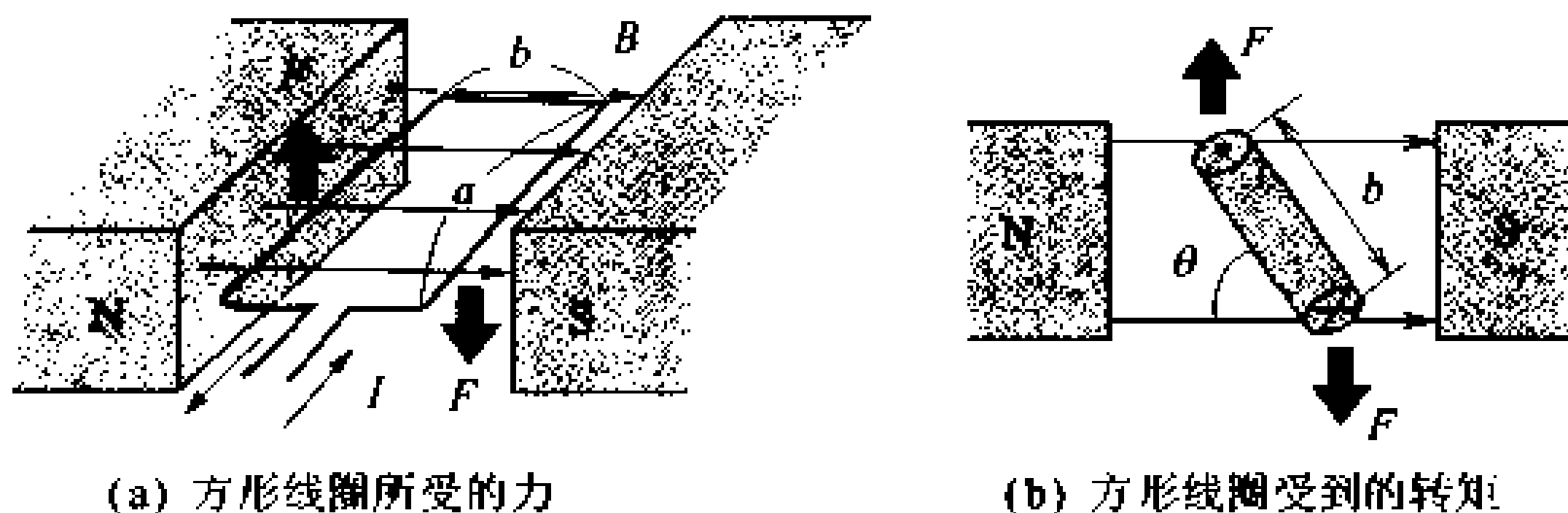


图 1.20 方形线圈的转矩

## 应用知识 马达

由于电磁力的作用, 电能可以转换为机械能。以此为目的的电器为马达(电动机)。如图 1.21 所示, 直流马达是给磁铁(磁极)所包围的线圈输入电流而输出电磁力所产生的转矩。

## 研究课题 直线电机列车

作为新的交通系统之一, 直线电机列车已处于实用化发展的进程中。特别是悬浮式的磁悬浮列车由于没车轮, 浮在空中前进, 没有滚动阻力, 使高速化成为可能。

不论是使车体浮起或是前进, 都是利用电磁力的作用。如图 1.22(a)所示, 车身浮

起是利用车身磁铁和地面上的磁铁产生的浮力。如图 1.22(b)所示,列车前进则是利用车身磁铁与推进磁铁产生的直线作用力。

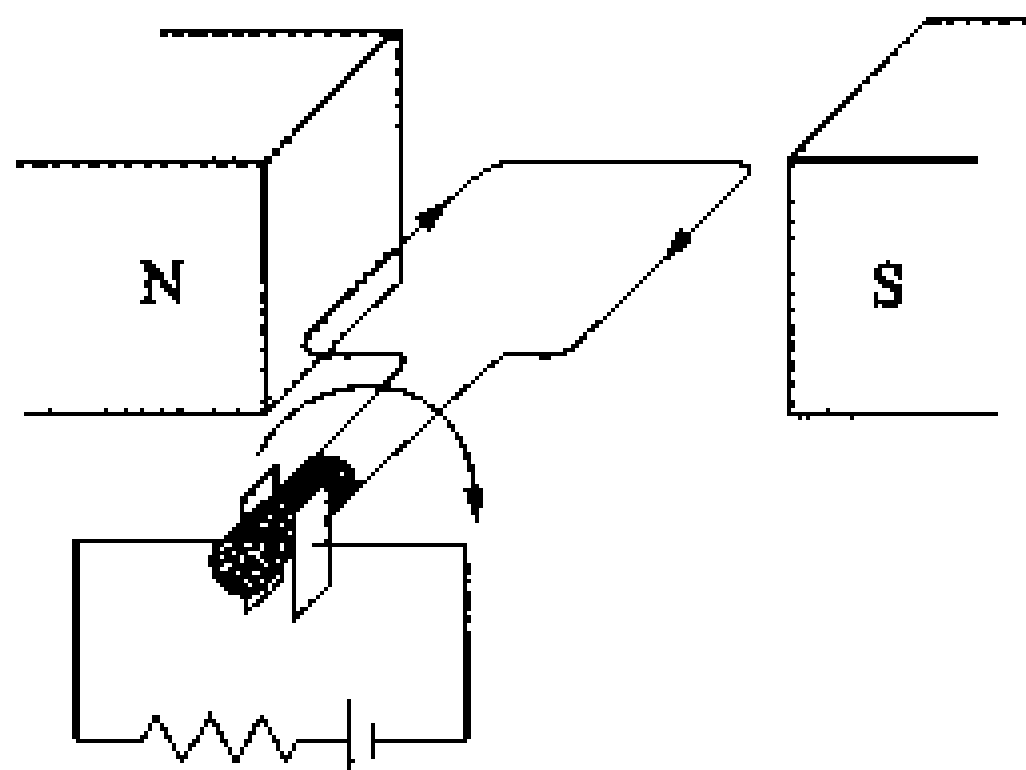


图 1.21 直流马达的原理

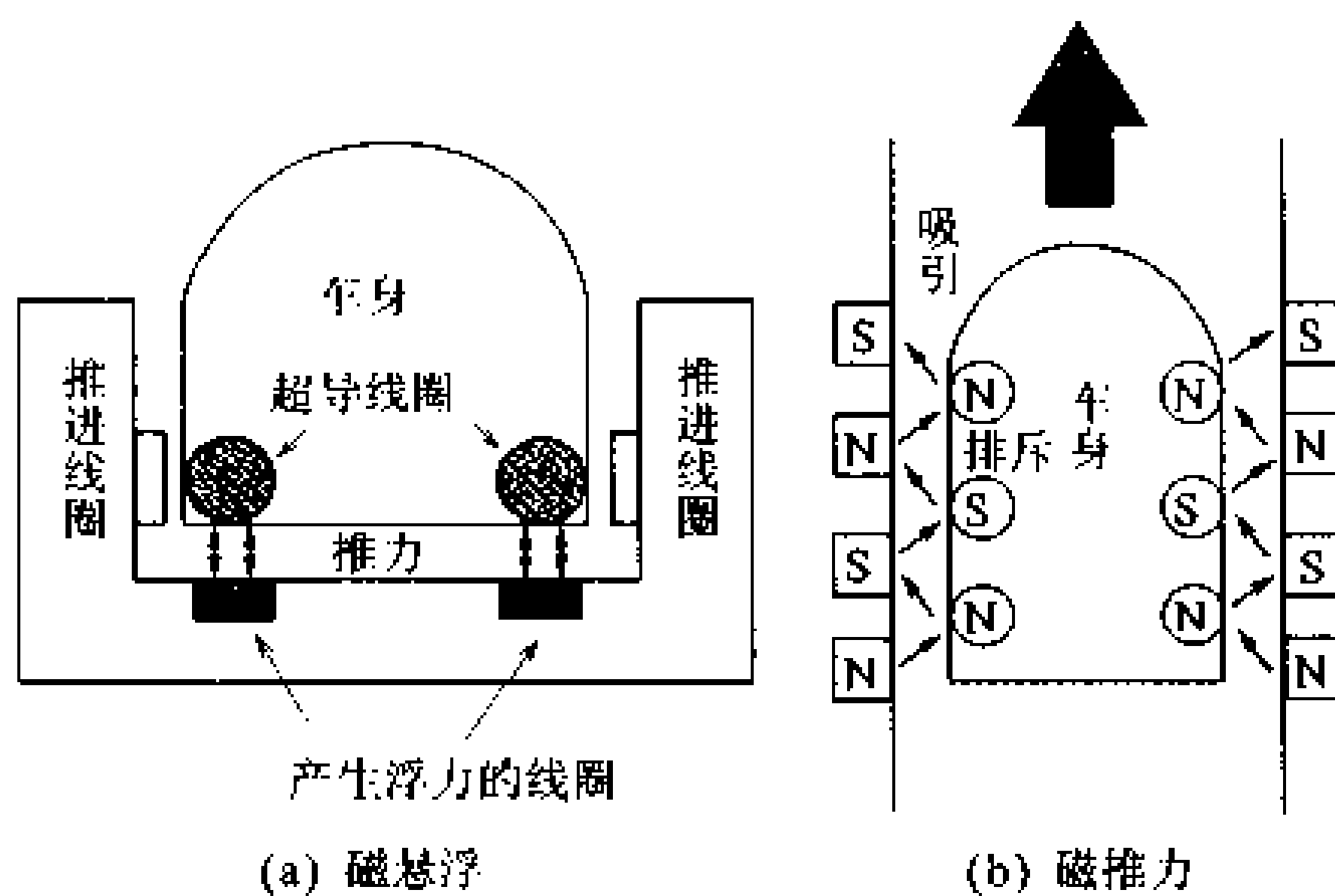


图 1.22 磁悬浮列车

# 5 电磁感应

## □ 要点

线圈磁通交链时,不论是线圈运动或是磁通变化,线圈中都会产生电动势。这个现象称为电磁感应。从法拉第定律可以知道电动势的大小,从楞次定律和弗来明左手定则可确定电动势的方向。

## □ 解释

### ● 电磁感应

如图 1.23 所示,如果将磁铁从线圈中拉出或者插入,与线圈联接的检流计指针就会摆动。这是由于磁铁与线圈交链的磁通变化在线圈中产生电动势。这种现象称为电磁感应,其电动势称为感应电动势。如果磁铁固定而线圈运动,同样也产生电动势。从以上实验可以得到以下的结论:

- ① 交链的磁通发生变化时产生电动势,它包括磁通本身发生变化或者是导体切割磁力线两种情况。
- ② 当相互交链的磁通增加或者减小时,所产生的电动势方向相反。
- ③ 交链的磁通变化越快,所产生的电动势也就越高。

电磁感应

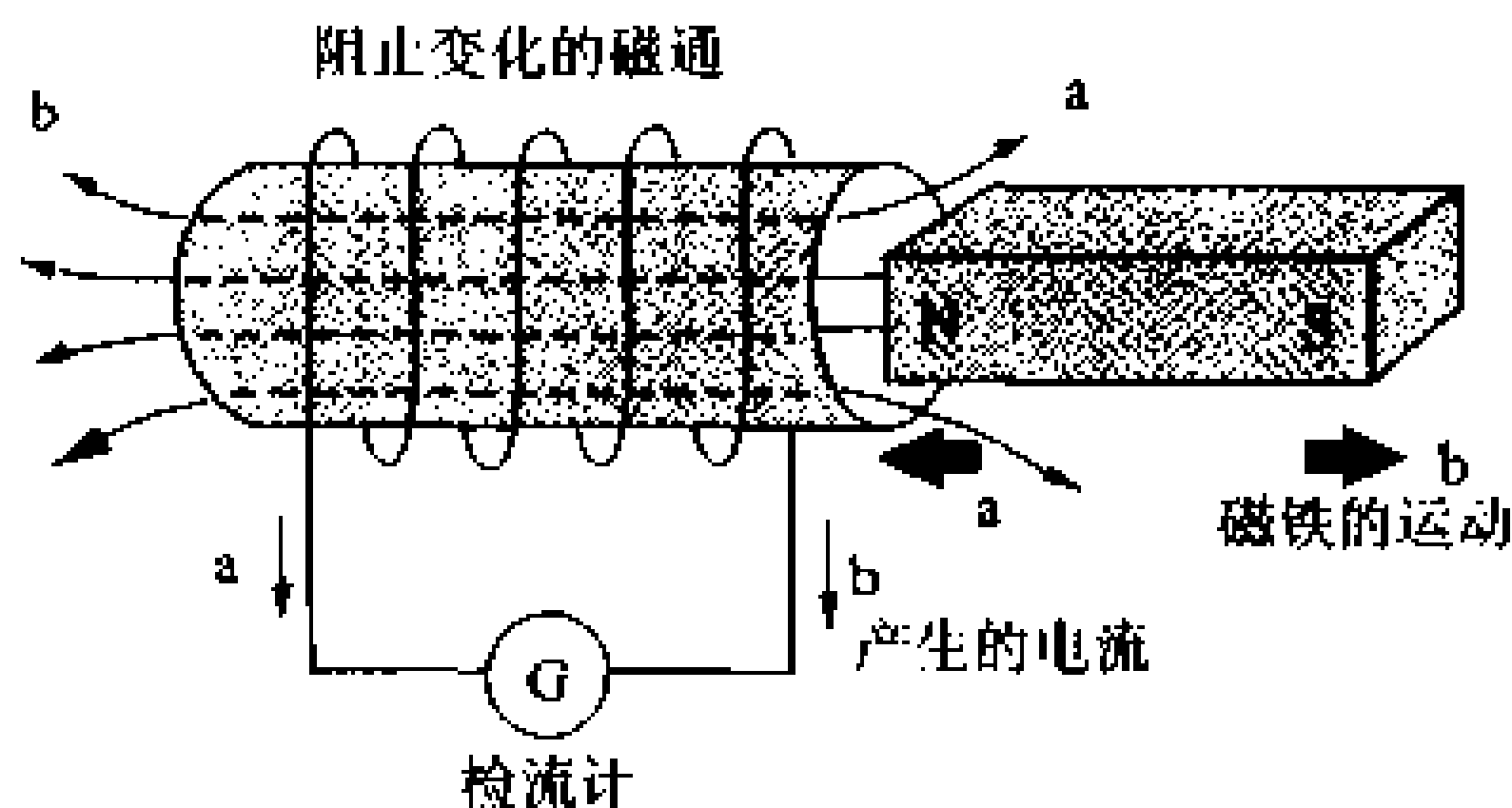


图 1.23 电磁感应

### ● 法拉第定律

电磁感应产生感应电动势的大小,与交链的磁通变化率成正比,这就是法拉第定律。在  $\Delta t[s]$  内磁通变化  $\Delta\phi[Wb]$  时,电动势  $e[V]$  为

法拉第定律

$$e = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} [Wb] \quad (1.24)$$

上式中负号的意义是,相互交链的磁通变化时,产生电动势的方向总是向着阻碍磁通变化的方向。

### 楞次定律

#### 楞次定律

如图 1.24 所示,“电磁感应所产生的电动势的方向,是使它所产生的磁通向着阻碍原磁通变化的方向”,这就是楞次定律。

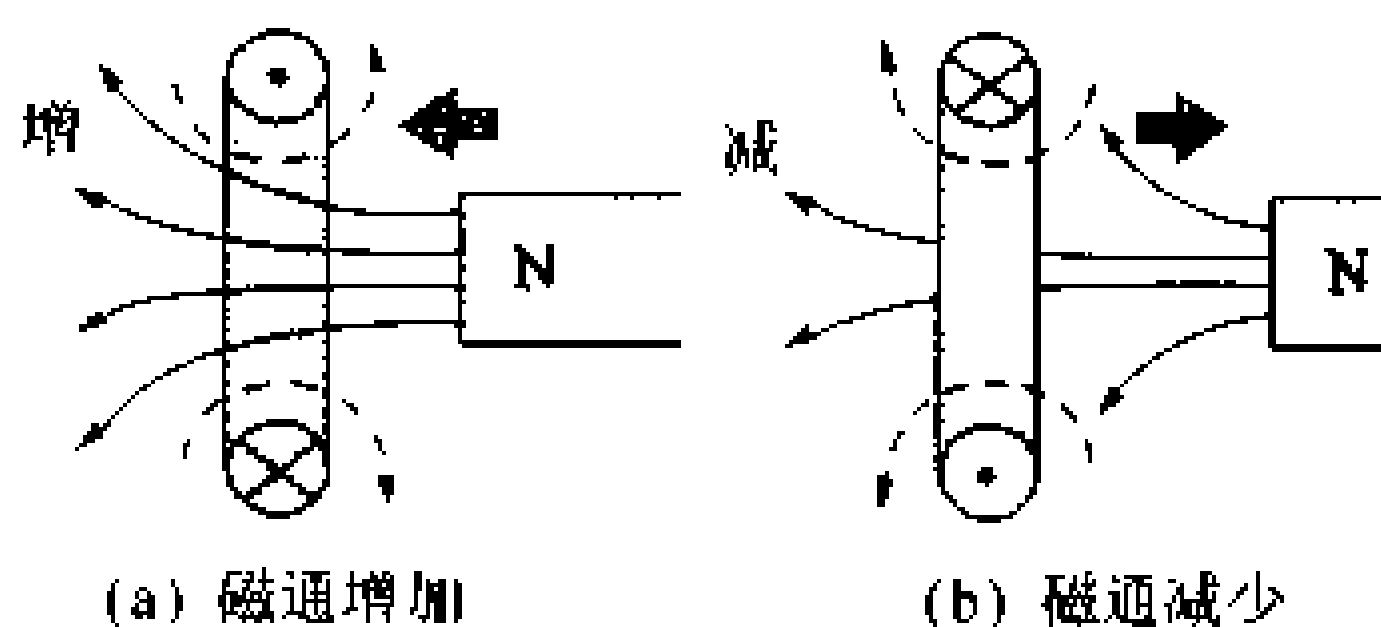


图 1.24 楞次定律

### 弗莱明右手定则

#### 弗莱明右手定则

用磁场方向和导体运动方向来表示感应电动势方向的法则称为弗莱明右手定则。如图 1.25 所示,用互成直角的右手的三个手指,食指表示磁场方向,母指表示导体运动方向,中指即为感应电动势的方向。

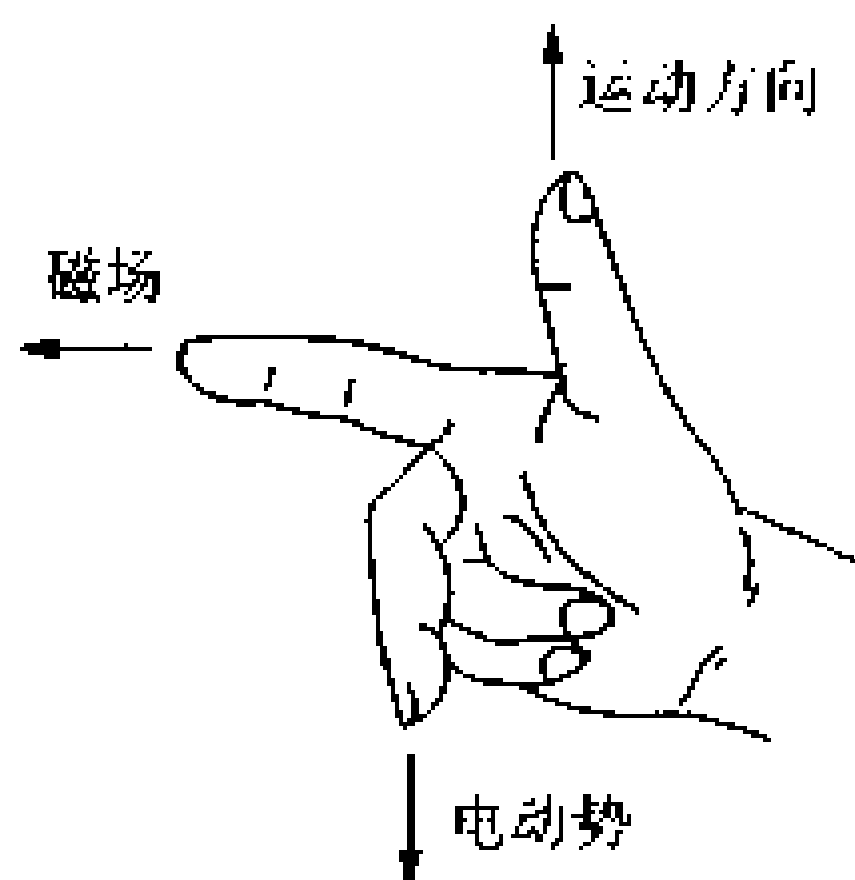


图 1.25 弗莱明右手定则



# 6 自感与自感系数

□ 要 点

流过线圈的电流发生变化时,线圈本身就会产生电动势,称为自感。表示自感作用大小的量称为自感系数,它决定于线圈的匝数和形状。

□ 解 释 ● 自 感

自感

如图 1.26 所示,如果流过匝数为  $N$  的线圈的电流在  $\Delta t$  秒内变化  $\Delta I$  [A],所产生的磁通变化为  $\Delta \Phi$  [Wb],则线圈本身会产生阻碍磁通变化的电动势  $e$  [V]。这种现象称为自感。产生电动势的大小可用下式表示:

$$e = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \text{ [V]} \tag{1.25}$$

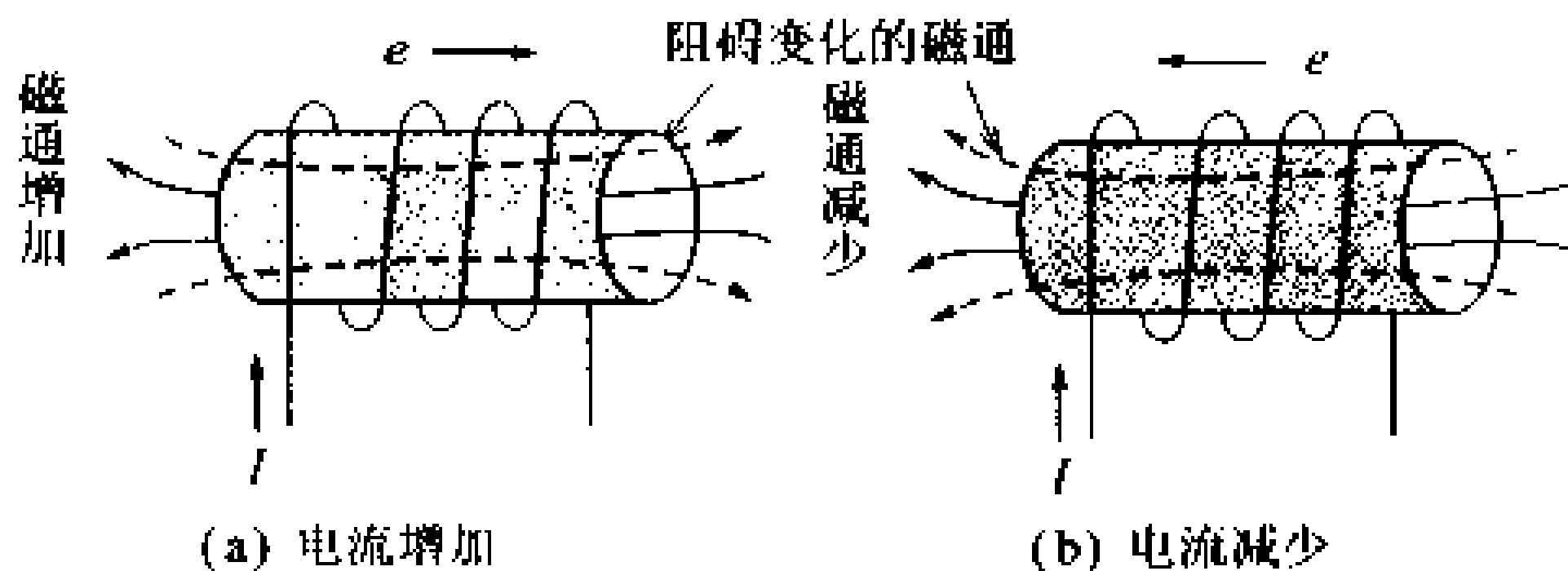


图 1.26 自 感

式(1.25)由于磁通的变化  $N\Delta\Phi$  与电流的变化  $\Delta I$  成正比,所以,

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ [V]} \tag{1.26}$$

自感系数

式中  $L$  称为自感系数(简称自感或电感),表示自感的作用大小,单位为亨[利][H]。在磁通和电流成比例的范围,可用下式表示自感:

$$L = \frac{N\Phi}{I} \text{ [H]} \tag{1.27}$$

## ● 环形线圈的自感

图 1.27 所示的环形线圈中,设线圈的磁导率为  $\mu$ ,截面积为  $A$  [m<sup>2</sup>],则:

$$\Phi = BA = \mu H A$$

从  $H = IN/l$ ,自感  $L$  可表示为

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \mu \frac{AN^2}{l} \quad [\text{H}] \quad (1.28)$$

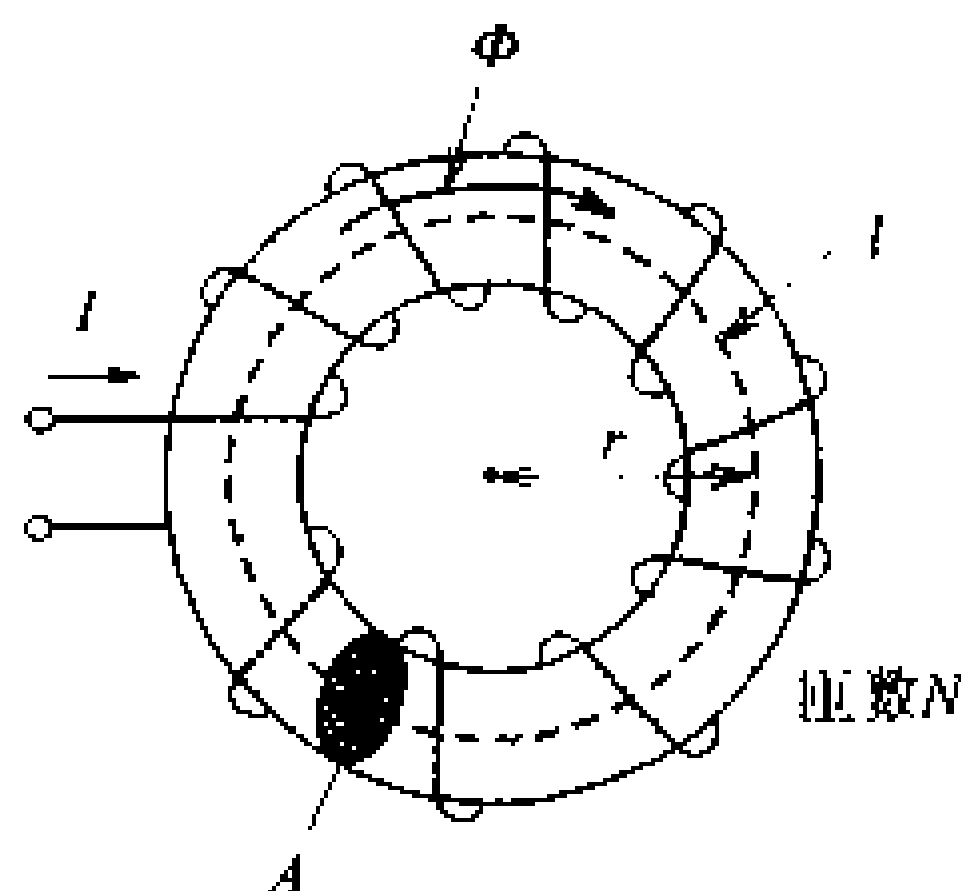


图 1.27 环形线圈的自感

### ● 圆筒线圈的自感

图 1.28(a)所示的无限长圆筒线圈中,线圈内部为均匀磁场,设每米线圈的匝数为  $n$ ,线圈的磁导率为  $\mu$ ,截面积为  $A[\text{m}^2]$ ,则每米线圈的自感  $L$  为

$$L = \frac{n\Phi}{I} = \mu n^2 A \quad [\text{H}] \quad (1.29)$$

如图 1.28(b)所示,在有限长线圈的情况下,由于漏磁通的影响,圆筒内的磁场不均匀。因而(1.28)式乘以实验得到的系数  $k$  (长度系数),即可得到:

$$L = k\mu \frac{A}{l} n^2 \quad [\text{H}] \quad (1.30)$$

长度系数

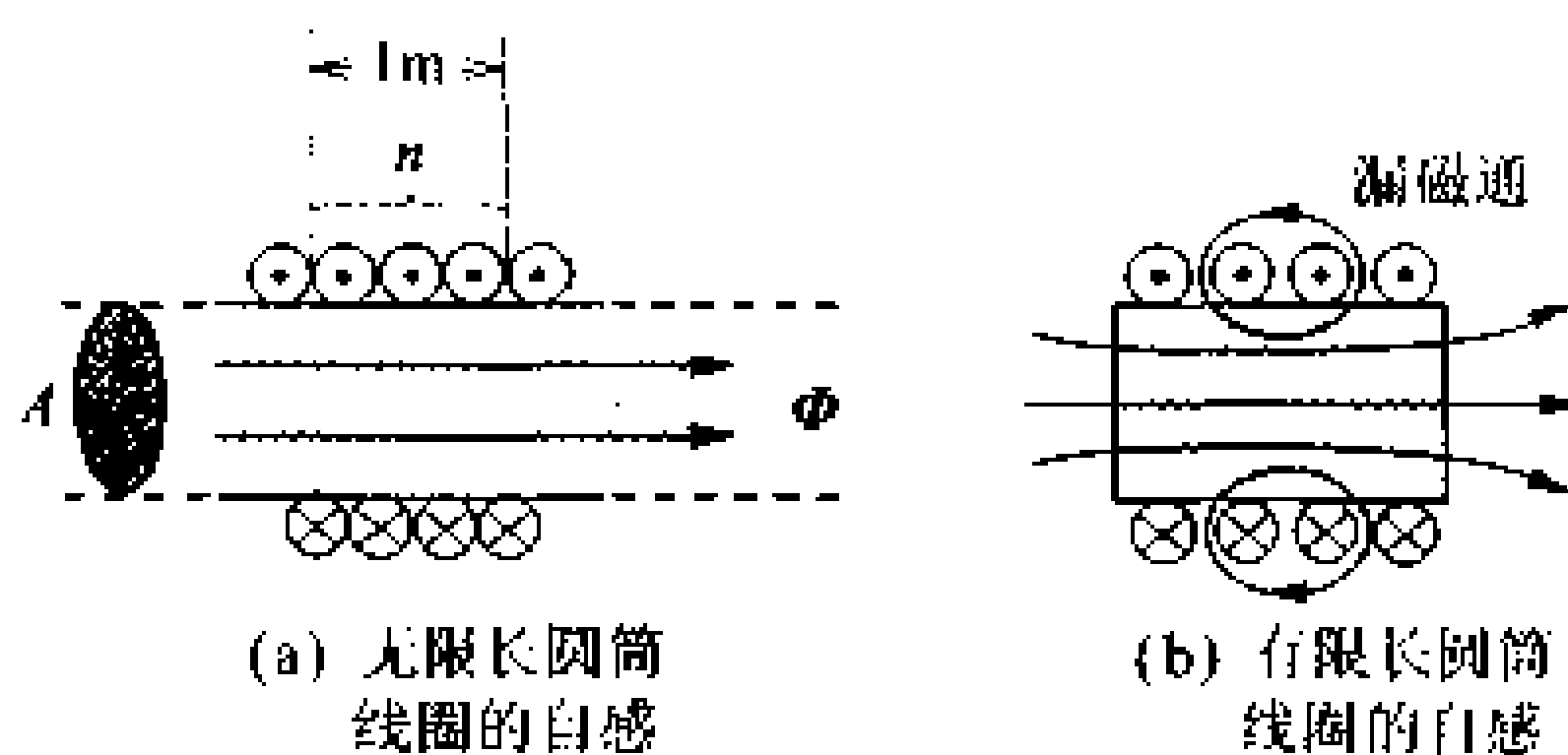


图 1.28 圆筒线圈的自感

# 7 互感与互感系数

□ 要 点

两个线圈相互邻近时,如果一个线圈流过电流,另外一个线圈就会产生电动势,称为互感。衡量互感作用大小的量,称为互感系数,它决定于两个线圈的匝数与形状。

□ 解 释 ● 互 感

如图 1.29 所示,相互邻近的两个线圈,如果一个线圈(一次线圈)中流过的电流发生变化,与另一个线圈(二次线圈)交链的磁通亦发生变化。于是由于电磁感应在二次线圈中产生电动势。该现象称为互感。

互感

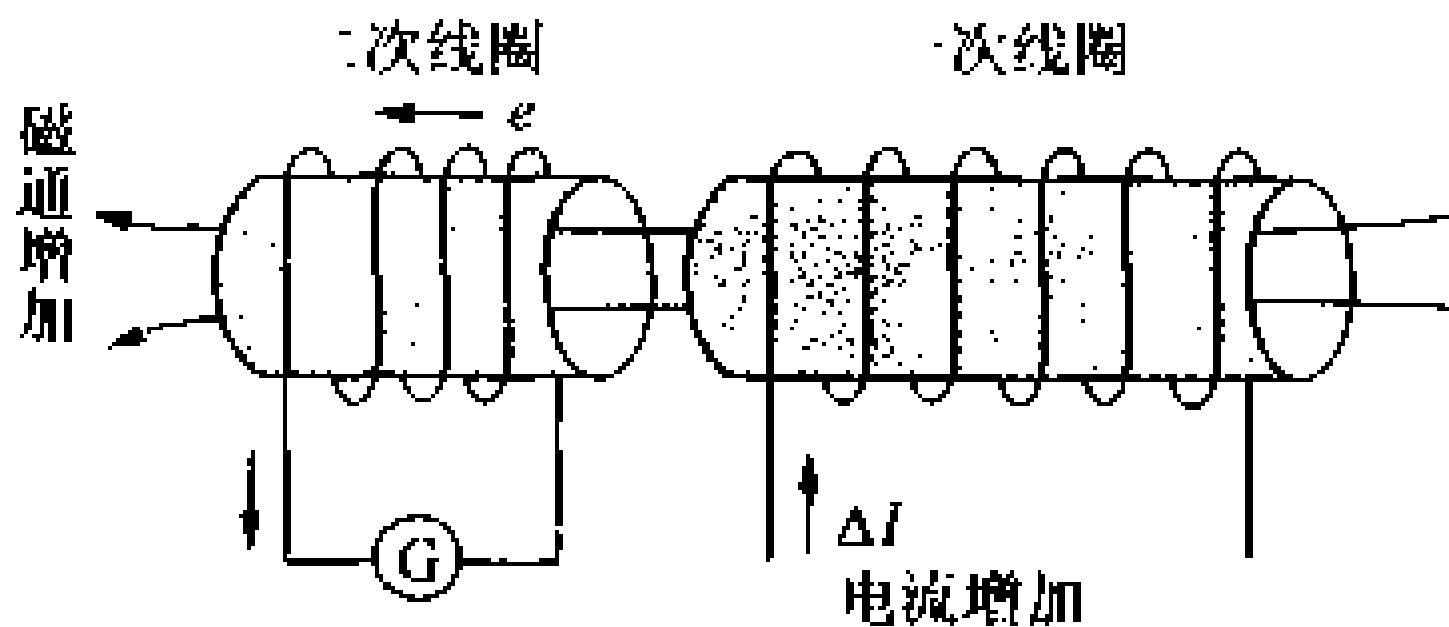


图 1.29 互 感

如果  $\Delta t$  秒内一次线圈流过的电流变化为  $\Delta I_1$ ,由于互感作用,二次线圈产生的感应电动势  $e$  可用下式表示:

$$e = -M \frac{\Delta I_1}{t} \text{ [V]} \tag{1.31}$$

互感系数

式中  $M$  称为互感系数(简称互感),它决定于各线圈的匝数、形状、相互间的位置以及周围的媒质,互感系数的单位也是亨利 [H]。

● 环形线圈的互感

如图 1.30 所示,在同一环形铁芯上卷绕匝数为  $N_1$ 、 $N_2$  的两个线圈,设磁路的平均长  $l$  [m],线圈的截面积为  $A$  [m<sup>2</sup>],铁芯的磁导率为  $\mu$ ,则可用下式表示互感:

$$M = \mu \frac{A}{l} N_1 N_2 \text{ [H]} \tag{1.32}$$

● 自感与互感的关系

例如、在图 1.30 的情况下,两个线圈的自感  $L_1$ 、 $L_2$  与互感  $M$

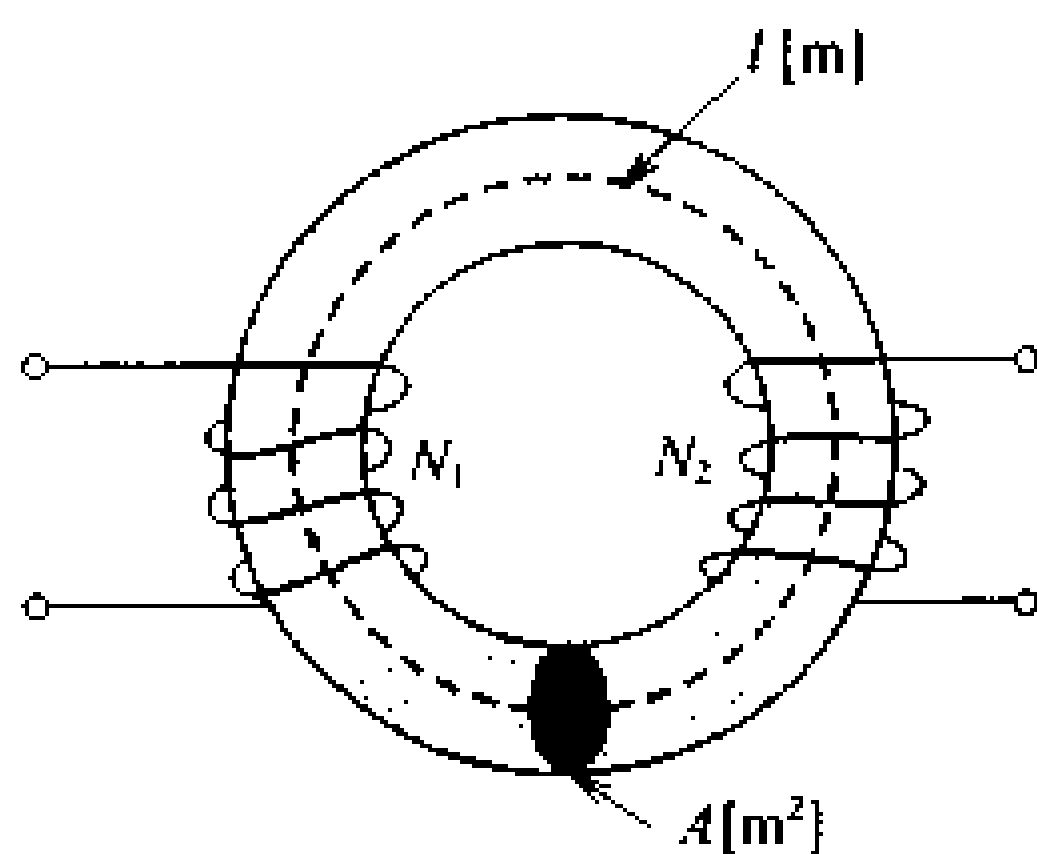


图 1.30 环形线圈的互感

之间的关系为

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad [\text{H}] \quad (1.33)$$

式中  $k$  称为耦合系数, 它表示两个线圈的耦合程度。如果  $k=1$ , 则表示无漏磁通, 耦合关系最为紧密。

### ● 电感的联接

如图 1.31 所示, 根据两线圈的联接方法, 它们所产生的磁通方向可有同向和反向两种。图 1.31(a) 称为和动联接, 图 1.31(b) 称为差动联接。由于联接方式不同, 合成的电感  $L_a, L_b$  也不同, 可分别表示为

$$L_a = L_1 + L_2 + 2M \quad [\text{H}] \quad (1.34)$$

$$L_b = L_1 + L_2 - 2M \quad [\text{H}] \quad (1.35)$$

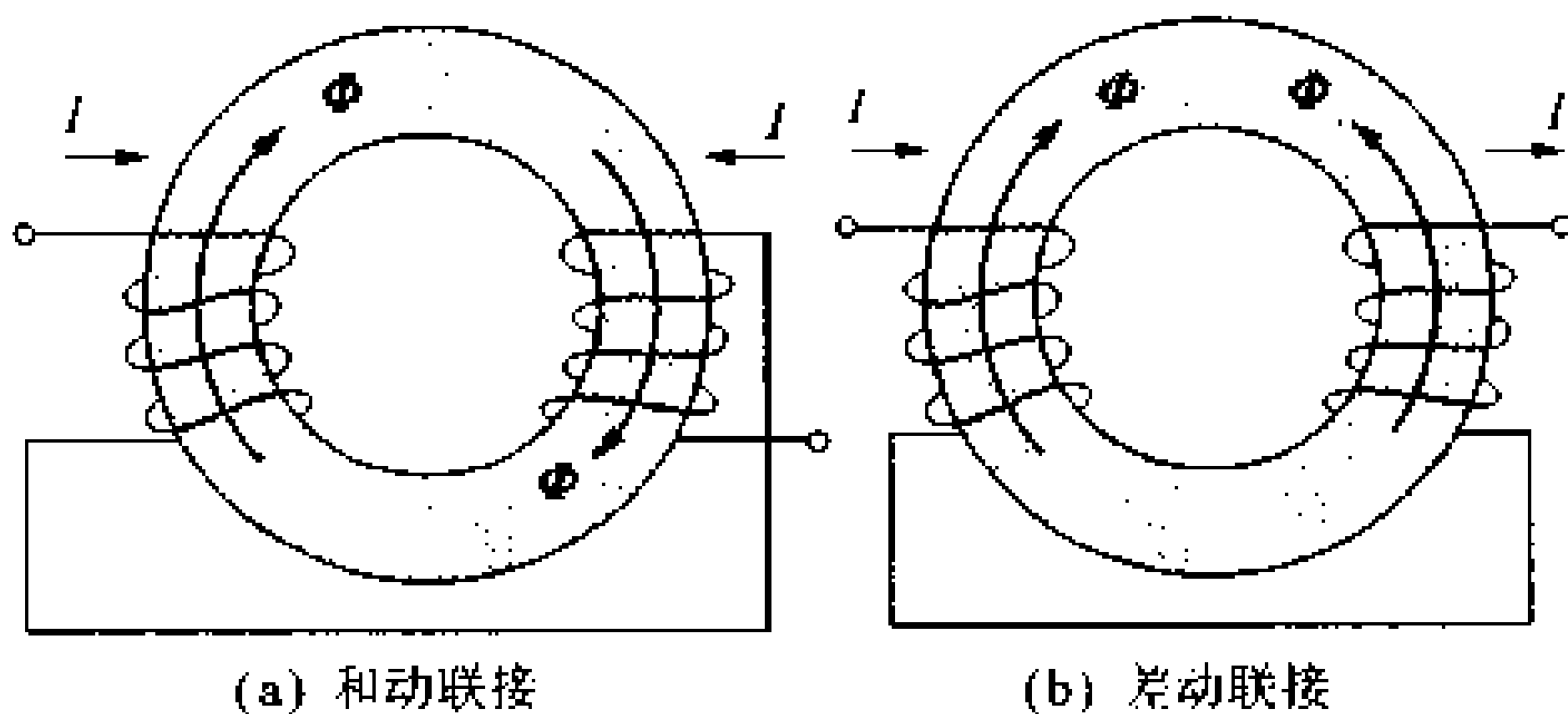


图 1.31 电感的联接

和动联接  
差动联接

# 8 线圈可储存磁能

**□ 要点** 线圈具有以磁能形式存储电能的能力。用磁滞回线可以理解磁性体磁化储能的过程。

**□ 解释** ● **磁 能**

如图 1.32 所示,在含有线圈的电路中,如果打开原来闭合的开关,则在开关断开的一瞬间,线圈的两端就产生高电压。这是由于要产生一个企图阻止线圈电流减少的电动势。即从电源供给的能量将以磁能形式储存下来。设线圈的电感为  $L[\text{H}]$ ,电流为  $I[\text{A}]$ ,则磁能  $W$  可用下表示:

$$W \approx \frac{1}{2} LI^2 \text{ [J]} \tag{1.36}$$

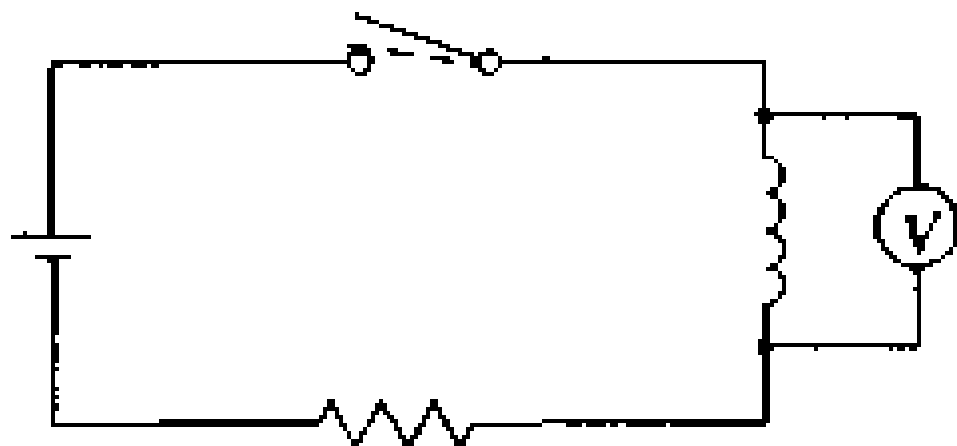


图 1.32 线圈储存的磁能

● **物质的磁化**

如图 1.33 所示,在无磁性的铁芯上卷绕线圈,如果流过电流,铁芯就有了磁性。这就表示线圈产生的磁场使铁芯磁化。图 1.34 表示所加的磁场强度  $H$  与被磁化物体磁通密度  $B$  之间的关系,该曲线称为磁化曲线( $B$ - $H$  曲线)。

磁化曲线  
( $B$ - $H$  曲线)

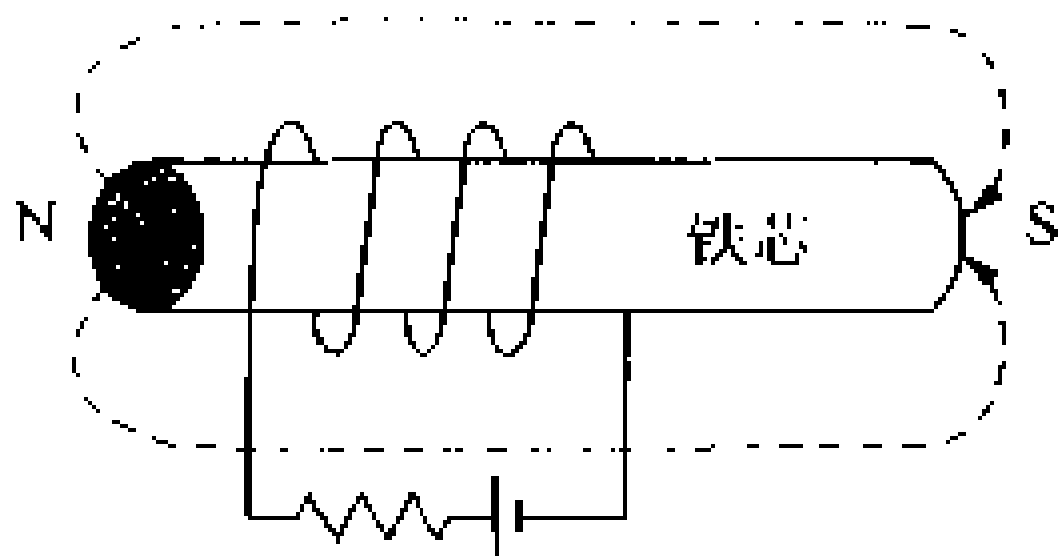


图 1.33 铁芯的磁化

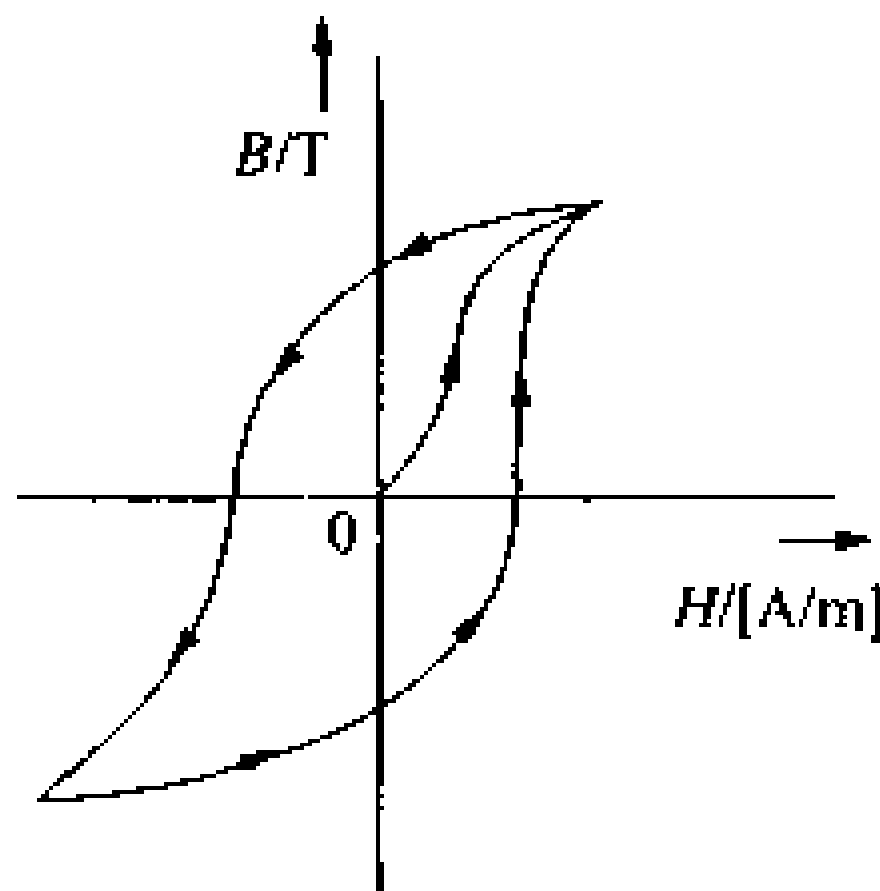


图 1.34 磁滞回线



铁之类的物质一旦被磁化,即使再减少所加的磁场,也不能得到同样的磁化曲线。图 1.34 表示的这种性质的曲线称为磁滞回线。这个闭合环(闭合回路)所围成的面积与该物质从磁场获得的能量成正比。

### ● 磁性体

#### 强磁性体

被磁化的物质(如图 1.33 的铁芯)称为磁性体。特别是铁、钴、镍等物质易于被强磁化,称为强磁性体。

进一步分析可知,物质的磁化与其内部的电子状态有关。如图 1.35 所示,原子是由原子核及绕原子核旋转的电子所组成。由于电子的运动形成电流,故该电子公转的轨道可看成是流过电流的导线,所以它的公转就产生了磁场。另外,电子还有自转(自旋)运动,如图 1.35(b)所示,该运动也会产生磁场。

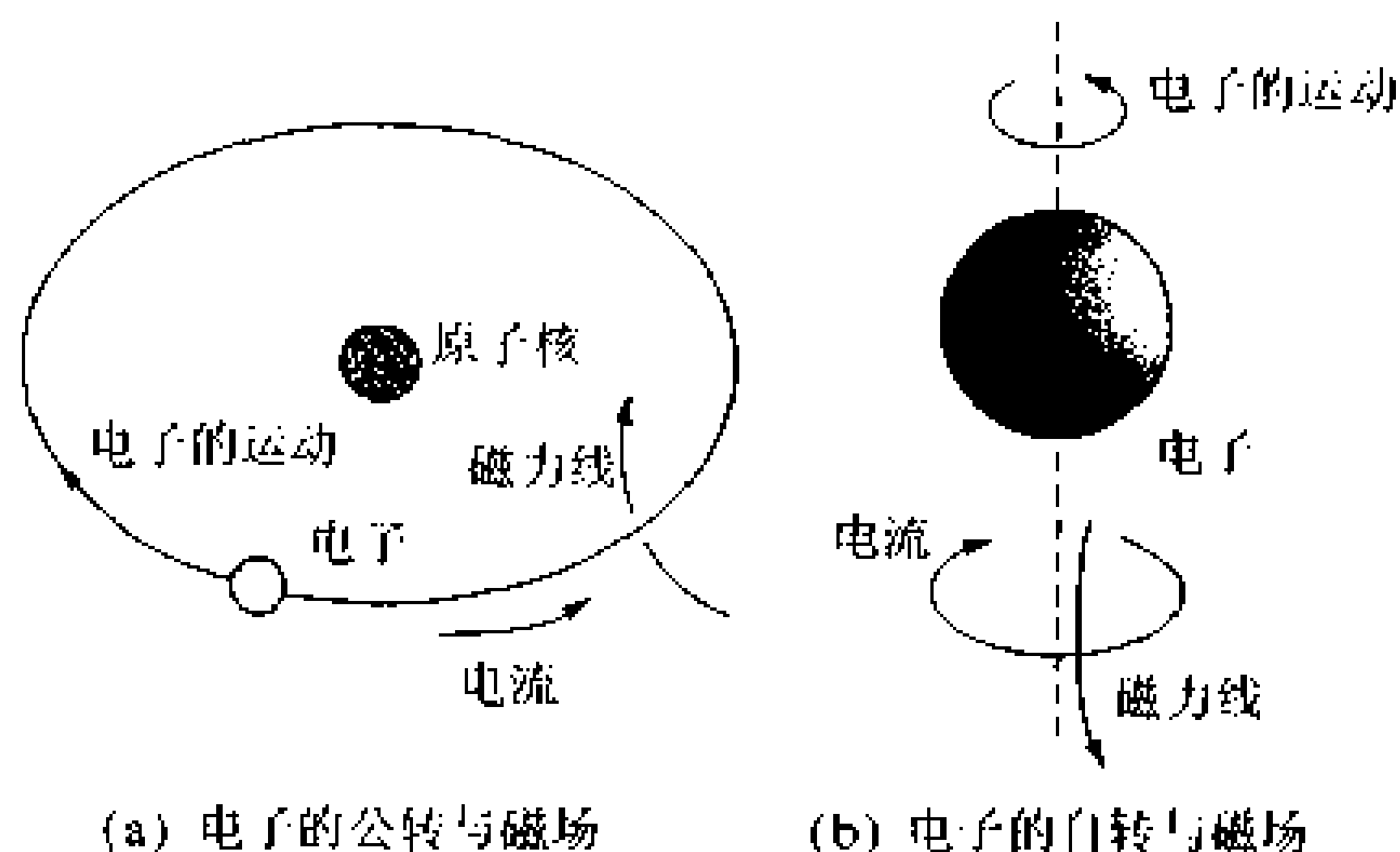


图 1.35 物质内部的电子运动

# 9 静电与库仑定律

## □ 要点

由摩擦等方法获得的电荷一般称为静电。静电具有吸引作用和排斥作用。根据库仑定律可以知道它们之间作用力的大小。

## □ 解释 ● 静电

静电

如图 1.36(a)所示,物体之间相互摩擦使物体具有多余电荷的现象称为带电。带电物体称为带电体。带电体所带电荷不像电流那样运动,处于静止状态,所以称为**静电**。

静电荷之间存在作用力,称为静电力。如图 1.36(b)所示,作用力的方向,在同种电荷间为相互排斥,异种电荷间为相互吸引。

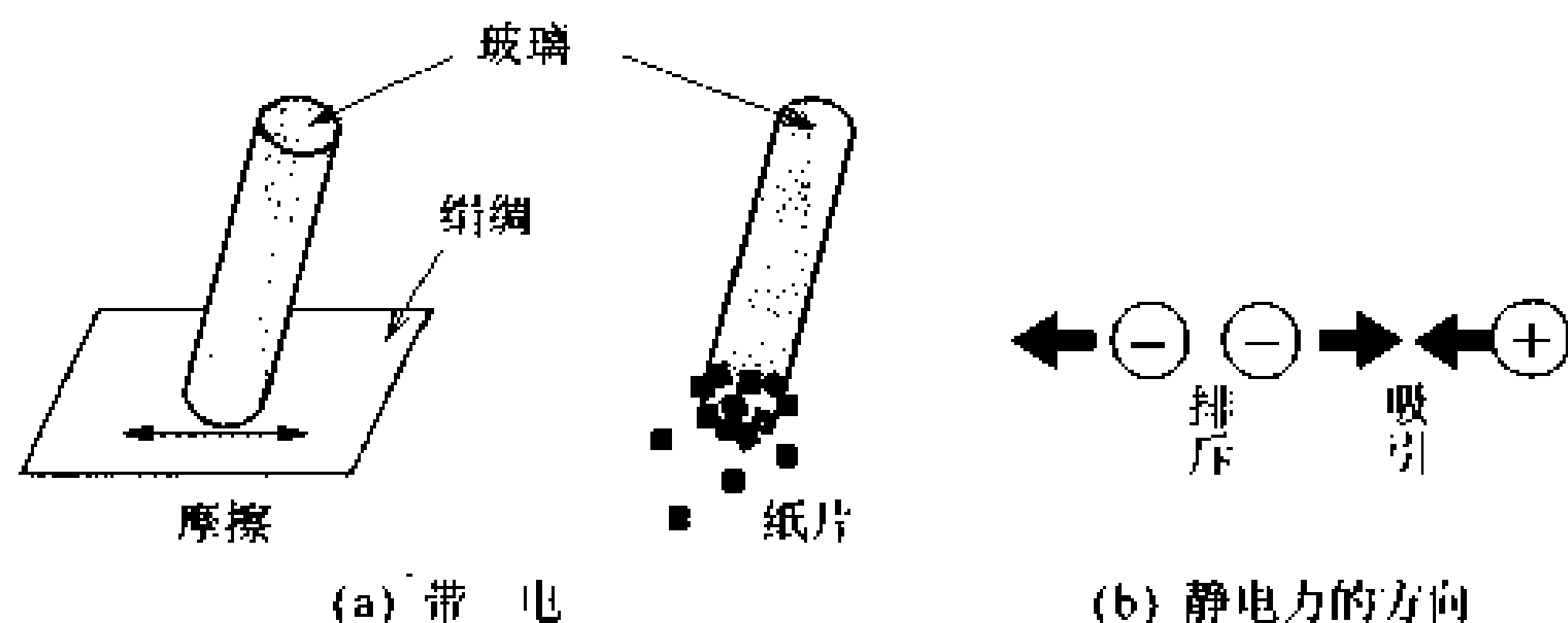


图 1.36 静电

## ● 库仑定律

库仑定律

如图 1.37 所示,两个电荷之间的作用力  $F$  与两个电荷量  $Q_1$  [C]和  $Q_2$  [C]的乘积成正比,与电荷间距离的平方  $r^2$  成反比,这就是关于静电的库仑定律,可用下式表示:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ [N]} \quad (1.37)$$

式中  $\epsilon$  称为介电常数,随电极间的物质不同而不同。在真空(空气)中为

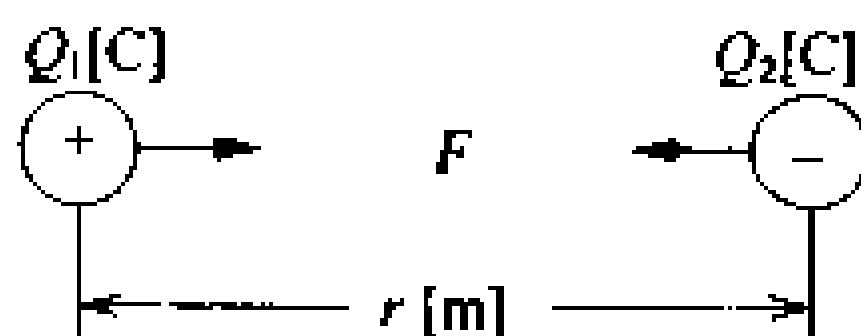


图 1.37 库仑定律

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$$

此时静电力为

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{Q_1 Q_2}{r^2} [\text{N}] \quad (1.38)$$

## □ 相关知识 ● 万有引力

与库仑定律一样,在图 1.38 的两个质点之间存在着万有引力,万有引力定律也可用下式表示,即与两质量的积成正比,与距离的平方成反比。

$$F = 6.67 \times 10^{-11} \frac{m_1 m_2}{r^2} [\text{N}] \quad (1.39)$$

根据该定律,作用于地球上 1kg 物质的引力为 9.8[N]。依据同样的方法,相距 1m 的两个 1C 的电荷,其静电力为  $9 \times 10^9 [\text{N}]$ 。如将它换成万有引力,则相当于 90 万吨物质之间的引力。幸亏存在地球引力,才不致使我们漂浮在空中,同样由于电荷之间存在静电力,才能使电荷保持稳定。

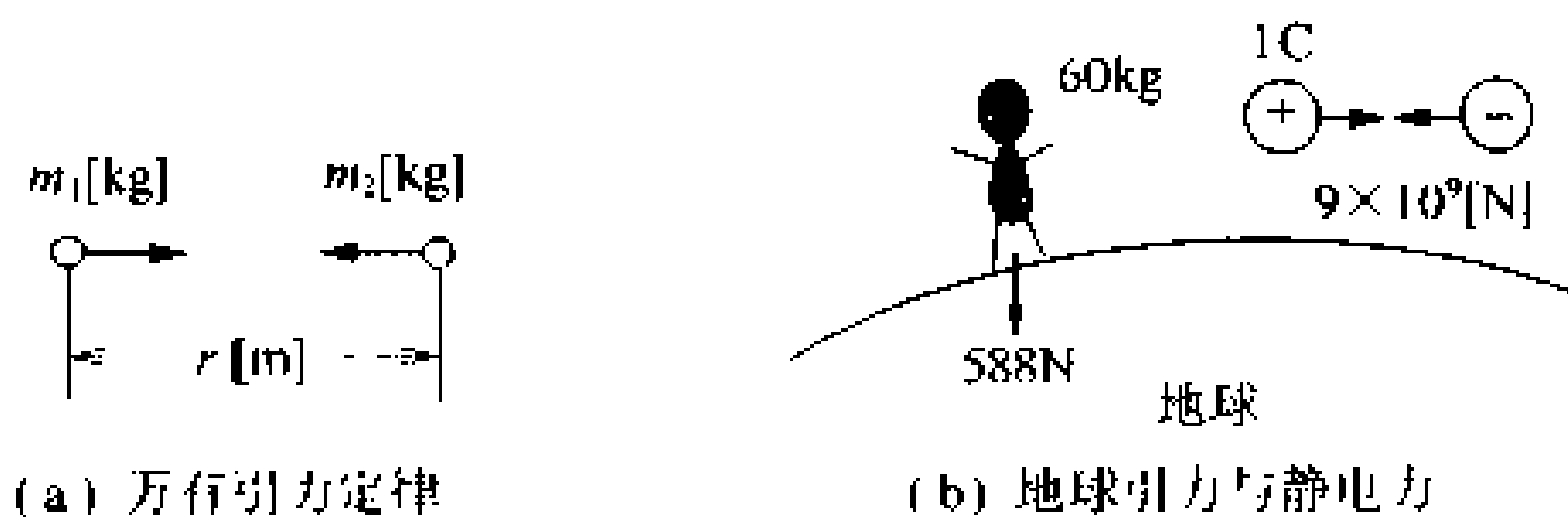


图 1.38 万有引力

## ■ 应用知识 ● 静电力的作用

作为自然现象的静电,大家都知道的讨厌事情,就是我们周围的家具、装饰品吸附灰尘的现象。这个性质可用于空气净化器的集尘。复印机的复印原理也是利用静电。它是先将着色剂附着在磁鼓上,然后再转印到复印纸上。在产业技术方面亦有应用,静电涂装已被广泛应用。

# 10 电场与电位

## □ 要点

静电力作用的空间称为电场。在电场中使电荷逆电场移动所做的功,称为电位。电场中不同的点具有不同的电位,两点之间电位的差,称为电位差。

## □ 解释

### ● 电场中电荷所受的力

在电荷的周围如有其它电荷接近,根据库仑定律,将存在静电力的作用。如图 1.39 所示,距离电荷  $Q$  为  $r$ [m] 的  $P$  点放置  $1C$  的电荷,由库仑定律可以得知电荷受到的静电力  $F$  为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{Q}{r^2} \text{ [N]} \quad (1.40)$$

电场

像这样在电荷周围存在静电力的作用空间,称为电场。电场强度  $E$ [V/m] 是  $1C$  电荷所受到的静电力,可表示为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{Q}{r^2} \text{ [V/m]} \quad (1.41)$$

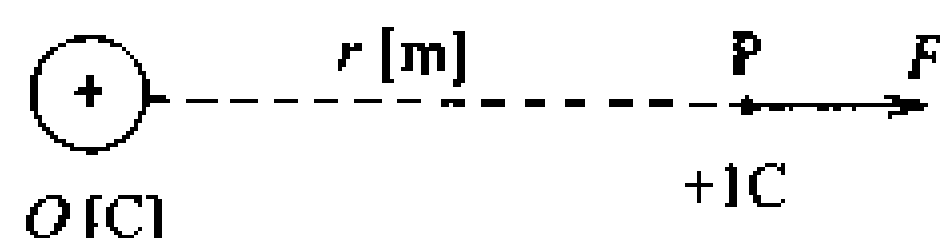


图 1.39 电场中的电荷

### ● 功和能

如图 1.40 所示,将  $1C$  的正电荷从不受电荷  $+Q$  电场影响的无限远处移近,就需要逆静电力做功。在图 1.40 中,为使  $1C$  的电荷移到  $A$  点比移到  $B$  点所做的功要多。这是因为在  $A$  点将储存更多的能量。这就是说  $A$  点比  $B$  点的电位高。两点之间电位的差值称为电位差。图 1.40 中,电荷  $Q$  在  $A$  点产生的电位可用下式表示:

电位差

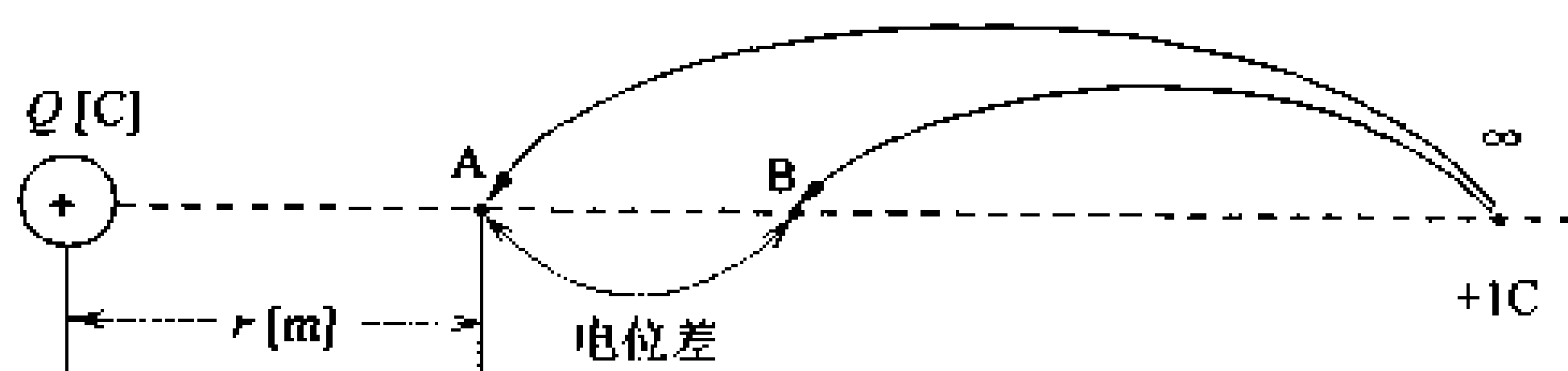


图 1.40 电位和电位差

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{Q}{r} \text{ [V]} \quad (1.42)$$

电位和电位差的单位均为伏特[V],也就是说电路中的电位差(电压)和电场中的电位差本质是相同的。

## □ 相关知识 ● 电通和电通密度

电通

为说明磁场的情况采用了磁通,同样,为说明电场的情况,也有如图 1.41 所示的电通。电通从正电荷出发,终止于负电荷。从电荷  $+Q[\text{C}]$  发出的电通为  $Q[\text{C}]$ 。

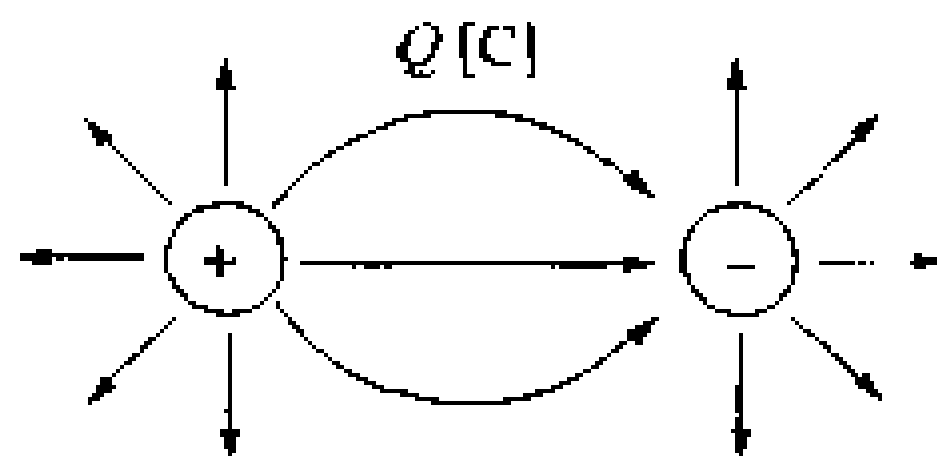


图 1.41 电场和电通

电通密度

可用电通密度  $D[\text{C}/\text{m}^2]$  表示电场强度,它表示在垂直于电场的每平方米面积上所通过的电通量。电通密度可表示为:

$$D = \epsilon E \text{ [C/m}^2\text{]} \quad (1.43)$$

介电常数

这里  $\epsilon$  称为介电常数,表示电通通过的难易程度。真空的介电常数  $\epsilon_0$  为

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

相对介电常数

某物质的介电常数与真空的  $\epsilon_0$  的比值称为相对介电常数  $\epsilon_r$ ,可表示为

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.44)$$



# 11 电容器的电容

**要 点** 电容器是储存电荷的器件。储存电荷的能力称为静电电容(电容)。多个电容器联接时,串联和并联所合成的总电容量是不同的。

**解 释** ● 几何尺寸与电容

如图 1.42 所示,两个导体分别带有电荷  $+Q[C]$  和  $-Q[C]$ ,如果导体之间的电位差为  $V[V]$ ,电荷和电位差之间存在以下关系:

$$Q=CV [C] \tag{1.45}$$

公式(1.45)中的  $C$  称为电容,单位为法[F],表示储存电荷的能力。图 1.42(b)所示是平行板电容器,设导体的面积为  $A[m^2]$ ,导体的距离为  $l[m]$ ,介电常数为  $\epsilon$ ,则电容  $C$  可表示为

$$C=\epsilon \frac{A}{l}=8.854 \times 10^{-12} \times \epsilon_r \frac{A}{l} [F] \tag{1.46}$$

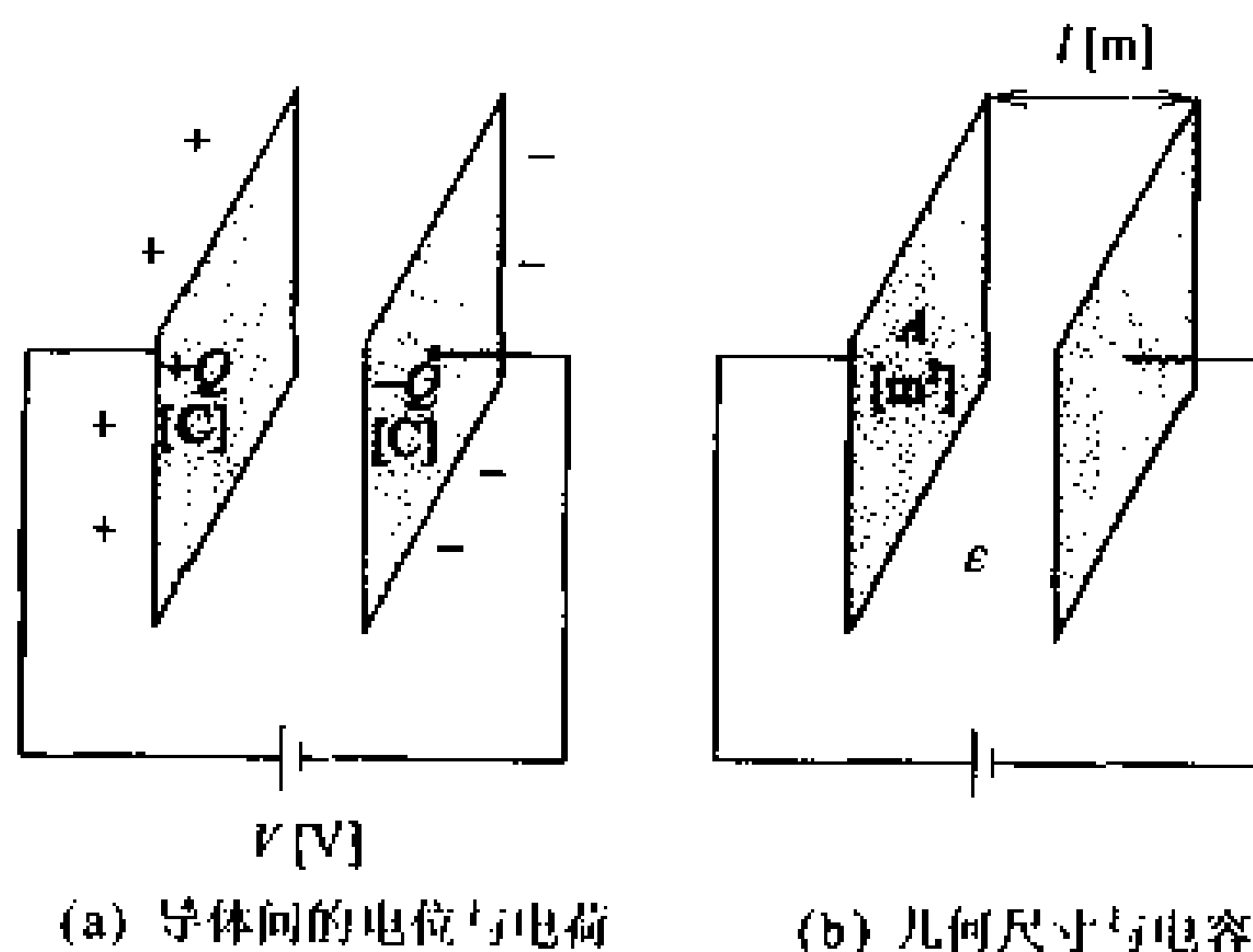


图 1.42 静电容量

## ● 串 联

在图 1.43(a)情况下,合成电容  $C$  为

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3} \tag{1.47}$$

## ● 并 联

在图 1.43(b)的情况下,合成电容  $C$  为

$$C=C_1+C_2+C_3 \tag{1.48}$$

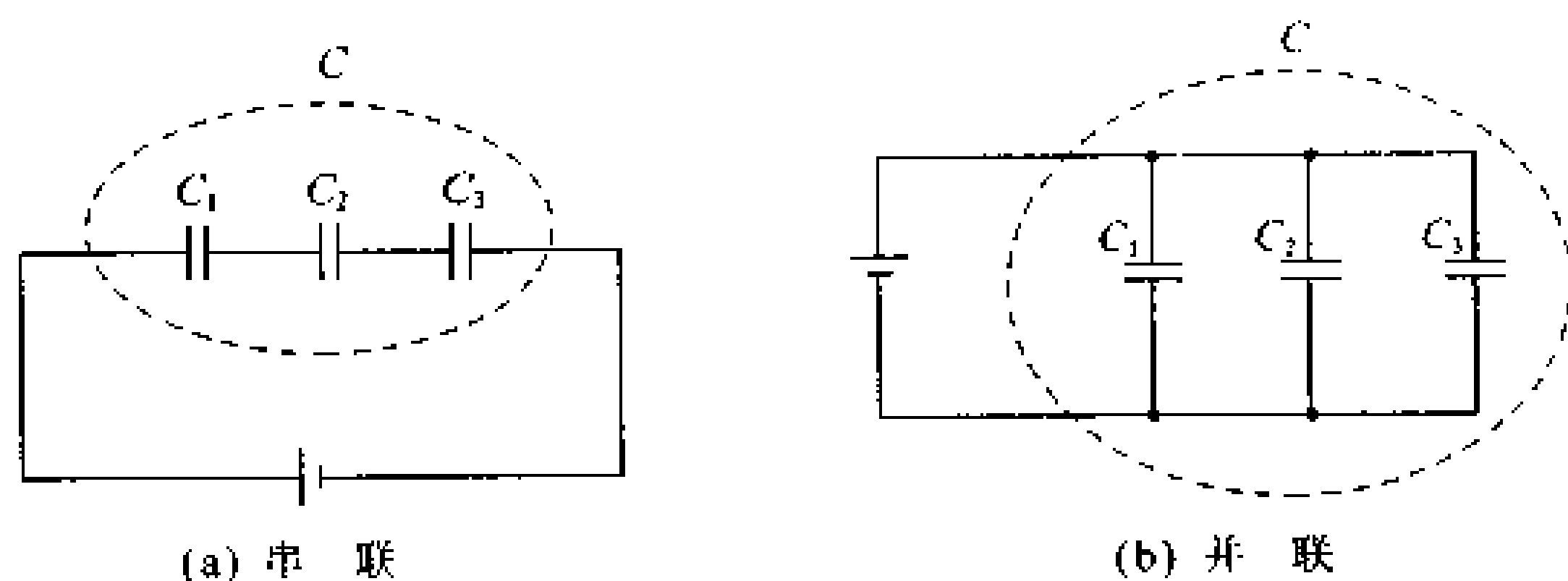


图 1.43 电容器的联接

### ■ 例 题

图 1.44 中  $C_1$  储存  $2.4 \times 10^{-3} [C]$  的电荷,  $C_2$  储存  $3 \times 10^{-4} [C]$  的电荷, 求 a、c 间的合成电容为多少?

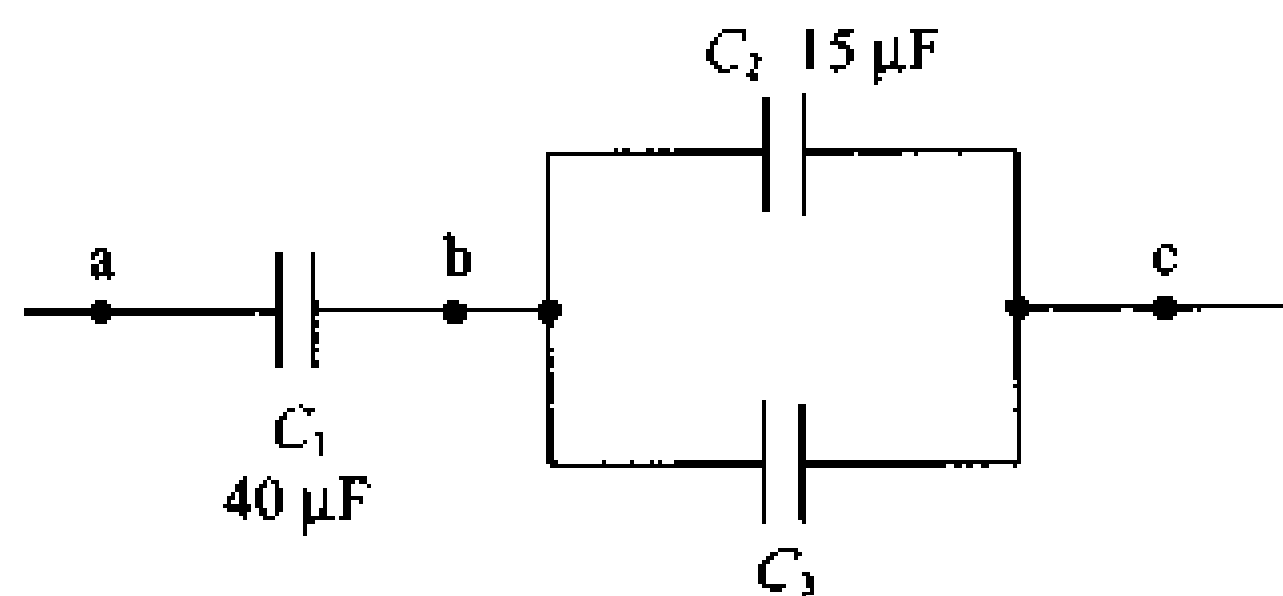


图 1.44 电容器的合成

**答** 由于 a、b 间和 b、c 间储存的电荷相等,  $C_3$  储存的电荷  $Q_3$  为

$$Q_3 = 2.4 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-4} = 2.1 \times 10^{-3} [C]$$

由于  $C_2$ 、 $C_3$  储存的电荷与各自的电容成比例, 从  $C_3 : C_2 = Q_3 : Q_2$  可得  $C_3 = 105 \mu F$ 。所以合成电容 C 为

$$\frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3}} = 30 \mu F$$

# 12 电容器储存电能

□ 要点

由于电容器能储存电荷,所以它可以储存电能。为高效地储存电荷,电容器的极板之间必须插入电介质。电介质是利用电介质极化在其表面产生电荷的物质。

□ 解释

● 静电能

把电容器储存电荷的过程称为充电,把放出电荷的过程称为放电。由于电容器能储存电荷,所以可以储存电能。这种能量称为静电能。

静电能

设电容器的电荷为  $Q$ ,此时的电压为  $V$ ,如图 1.45 所示,它所储存的电能  $W$  可表示为

$$W = \frac{1}{2} VQ = \frac{1}{2} CV^2 \text{ [J]} \tag{1.49}$$

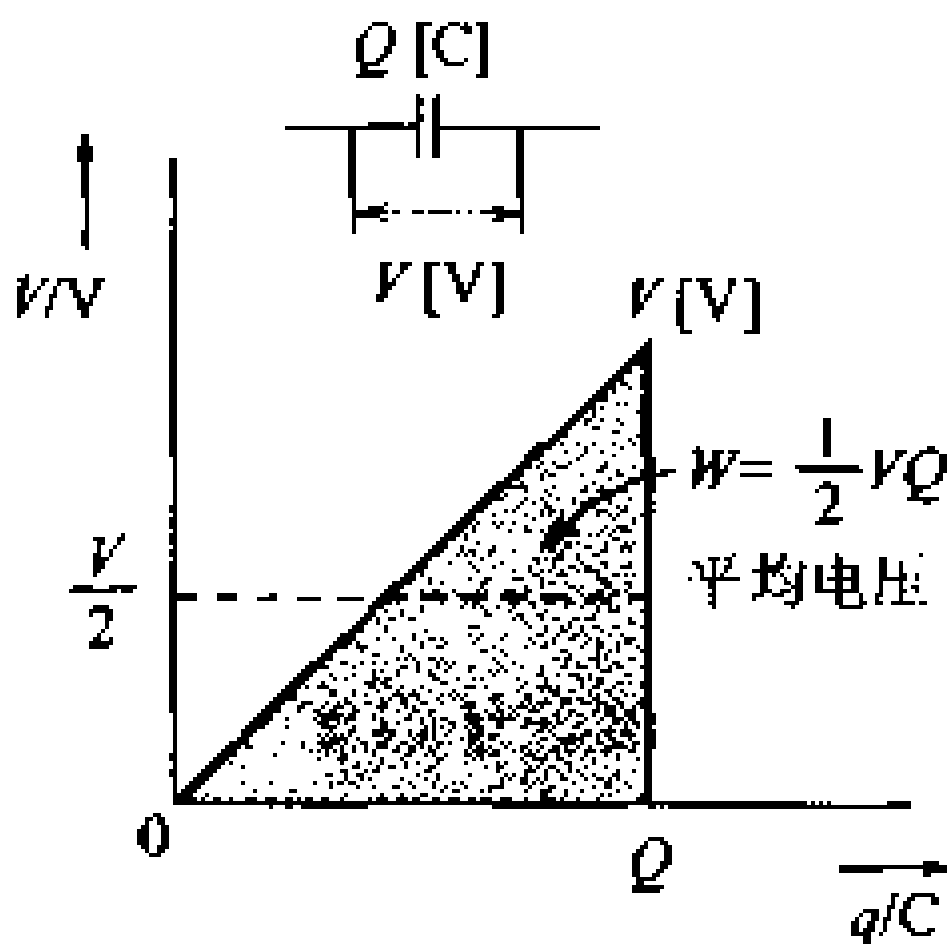


图 1.45 电容器的充电

● 介质极化

如图 1.46 所示,在绝缘体两端加电压,绝缘体的分子则极化为正、负端。它作为整体,是电中性的,但在两个端部将出现电荷。这种现象称为电介质极化。

电介质极化

● 电介质

分析两电极之间有绝缘体的电容器(图 1.46),为了抵消绝缘体的极化电荷,电极上就会产生电荷。也就是说,为了增大电容器的电容,可以在电极间插入极化强度大的绝缘体。绝缘体可以储存电荷,从而使得电通密度增大,所以又叫电介质。

电介质

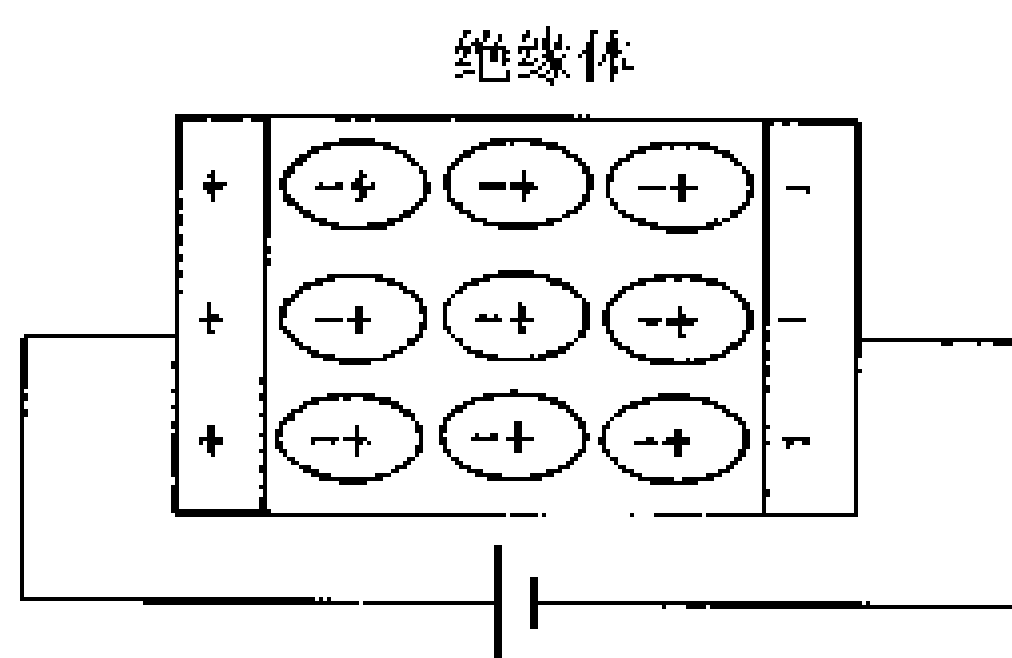


图 1.46 电介质极化

## 相关知识 ● 电介质的相对介电常数

表 1.1 列出各种物体的相对介电常数

表 1.1 相对介电常数  $\epsilon_r$

物质	$\epsilon_r$	物质	$\epsilon_r$	物质	$\epsilon_r$
氢	1.00026	纸	2.0~2.6	水	81
空气	1.00058	木	2.5~7.7	氧化钛	83~183
石蜡	1.9~2.3	玻璃	3.5~9.9	钛酸钡	1000~5000

[引自 电气学会编:袖珍电工学手册,1987,等]

## 应用知识

### ● 微波炉

给电介质加上电压,如果电场强度及方向不断变化,电介质分子中的电子、原子等将随电场的变化而振动,使一部分电能变成热能,称为介质损耗。微波炉就是基于这个原理,使用的频率为 2450MHz 的微波。用磁控管来加热物体。

### ● 特殊电介质

像玻璃和丝绸摩擦产生静电一样,对强磁性体施加压力或张力也会发生极化,使表面产生电荷。这种现象称为压电现象,它可以用于产生点火用的火花,如图 1.47 所示

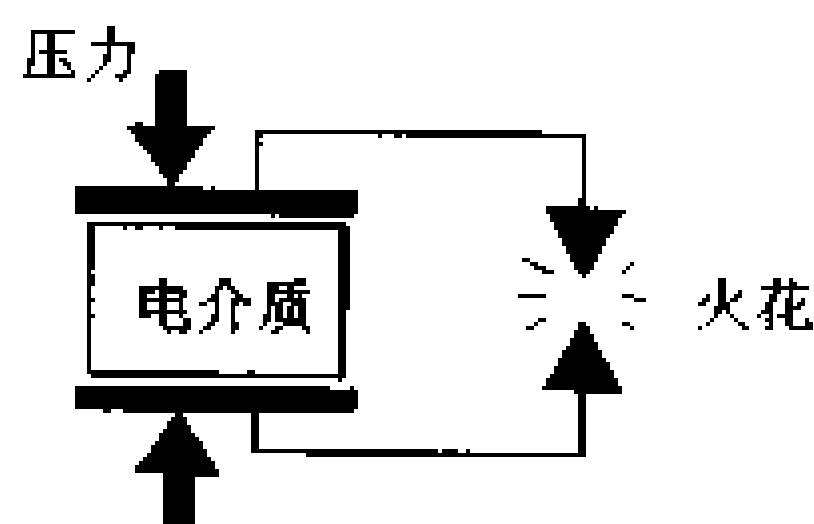


图 1.47 压电现象

# 13 直流电路的 $R, L, C$

**要 点** 影响直流电路的主要元件是电阻  $R$ 。可以用欧姆定律表示电阻与电流、电压之间的关系。多个电阻联接时的合成电阻，会因为串、并联的不同而不同。

**解 释** ● 直流电

如图 1.48 的曲线所示，电流的方向和大小均不随时间变化的电流称为直流电。

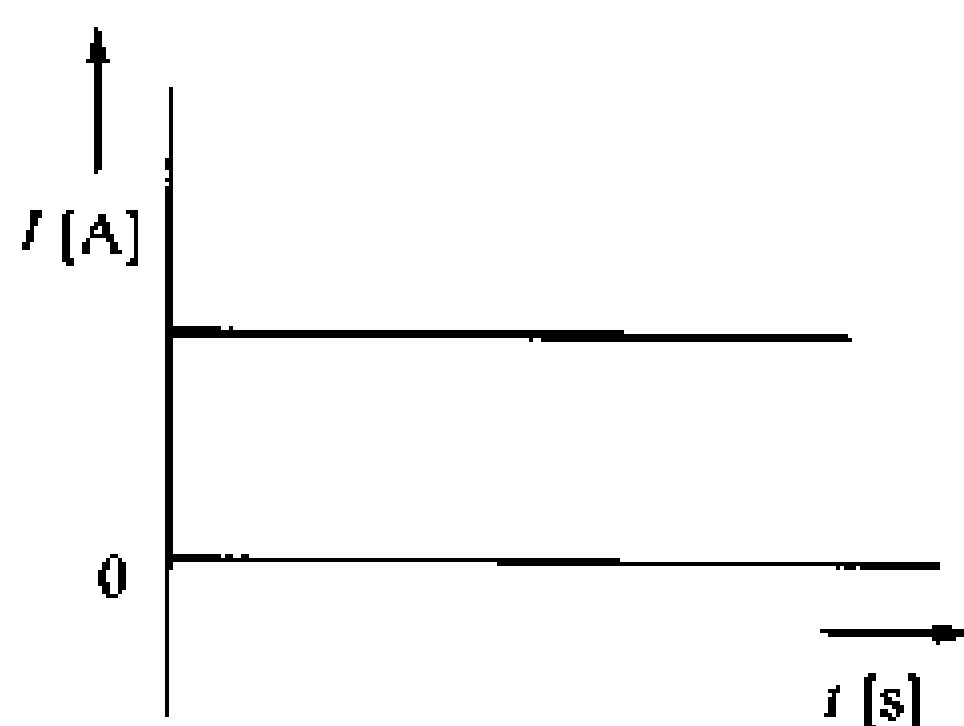


图 1.48 直流电流

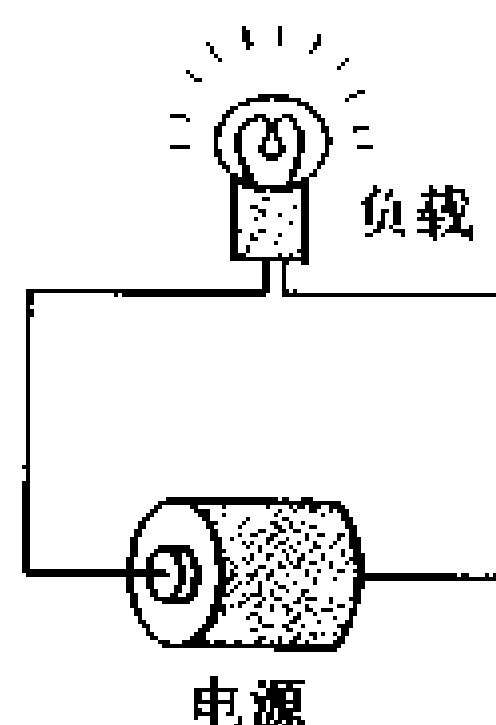


图 1.49 电源和负载

## ● 电流与负载

图 1.49 中的灯泡发光，是由于电池与灯泡联接起来有电流通过。电池的作用是产生电动势，具有电动势的装置称为电源。如果让灯泡持续亮着，不久亮度就会降低，继而熄灭。这是因为电池的电能被灯泡消耗了。这种消耗电能的装置称为负载。

## ● 流过 $R, L, C$ 的电流

在电路中，负载可以是电阻  $R$ 、线圈等的电感  $L$  和电容器的电容  $C$ 。如果给  $R, L, C$  分别加上一定的电压，流过的电流则如图 1.50 所示。

如图 1.50 所示，电阻在电路中起负载的作用。线圈的  $L$  与不影响电流通过的导线作用完全相同。电容器  $C$  仅在瞬间流过电流，电容器充电終了，电流也就停止了，故可以说电容器中无直流电流通过。因而在直流电流中，作为负载只需考虑电阻  $R$ 。

## ● 欧姆定律和电阻的联接

图 1.51 中设电压为  $V$ ，电流为  $I$ ，电阻为  $R$ ，三者有以下的关系：

$$V = RI \text{ [V]}, \quad I = \frac{V}{R} \text{ [A]}, \quad R = \frac{V}{I} \text{ [\Omega]} \quad (1.50)$$

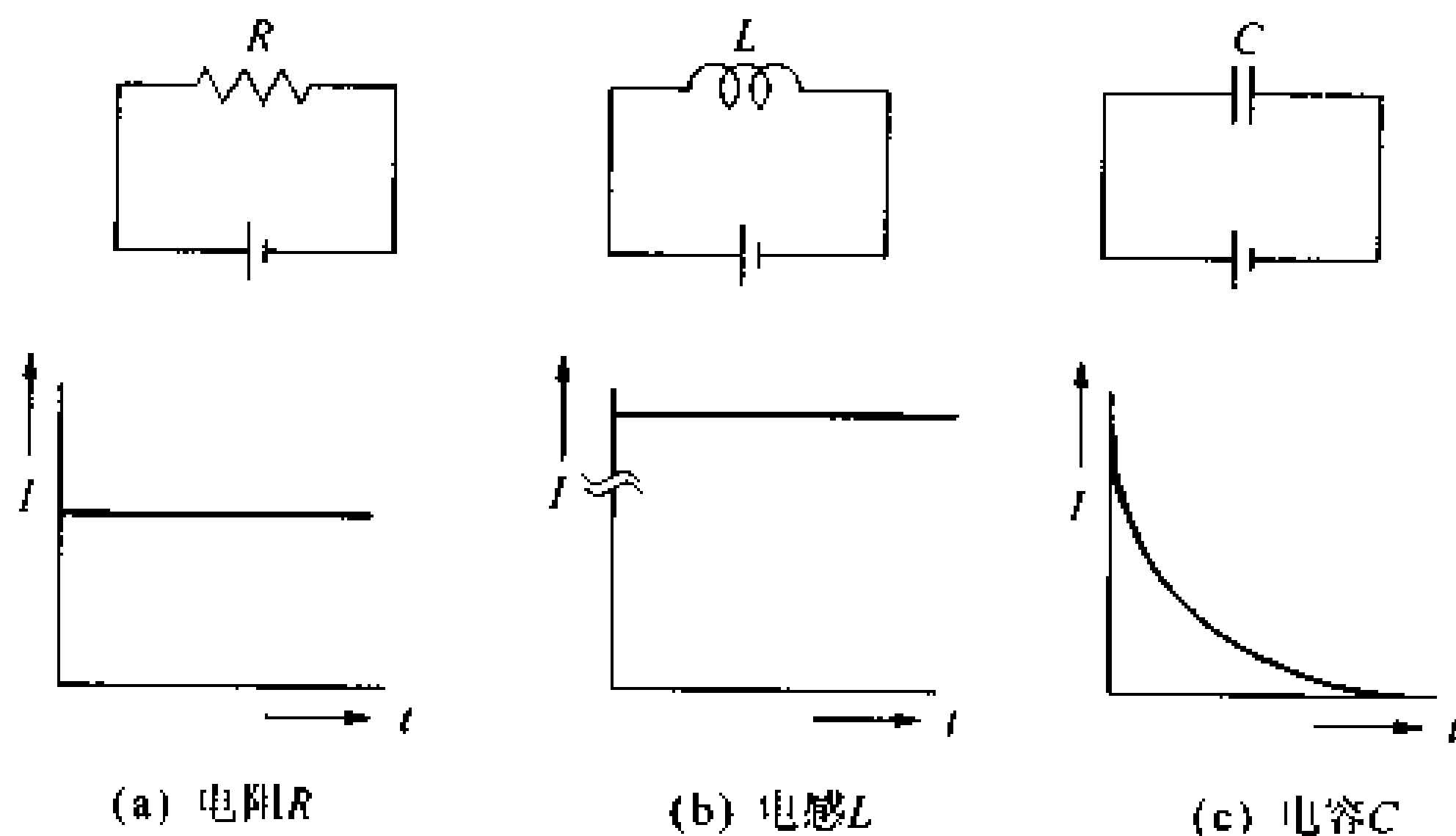
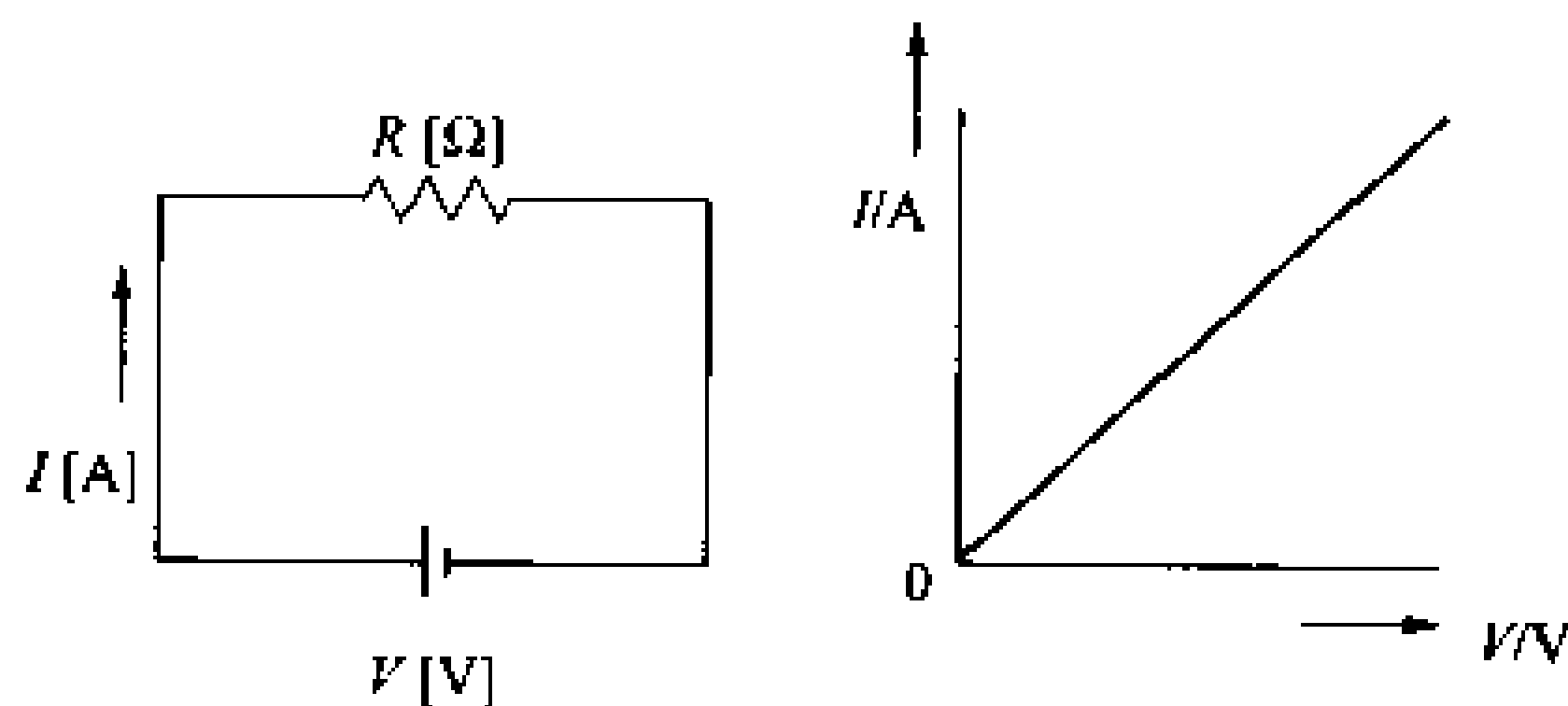
图 1.50  $R$ 、 $L$ 、 $C$  中的直流电流

图 1.51 欧姆定律

### 欧姆定律

可以看出, 流过电路的电流与电压成正比, 与电阻成反比, 这称为欧姆定律。

电阻的连接方法可有图 1.52(a) 的串联方式、图 1.52(b) 的并联方式以及如图 1.52(c) 所示的串并联方式。

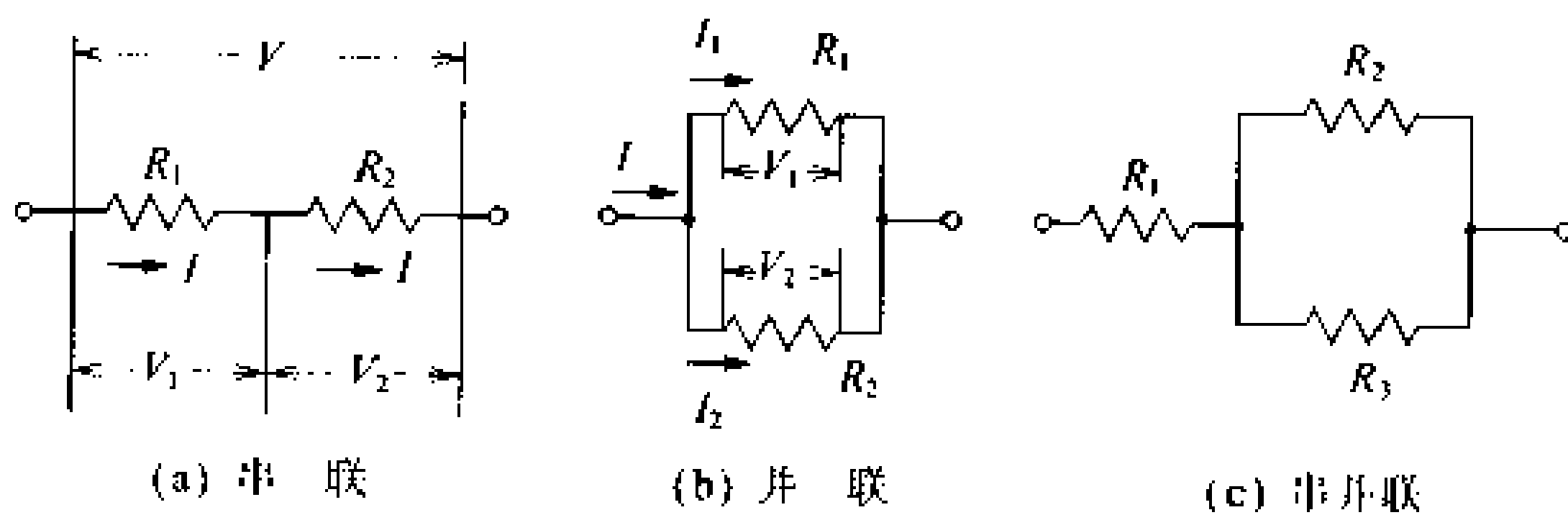


图 1.52 电阻的联接



### ● 串联电路的合成电阻

图 1.52 所示的由多个电阻连接起来的电路中,将它们合并后的总电阻称为合成电阻。

如图 1.52(a)所示,电阻串联时,由于电阻  $R_1$ 、 $R_2$  [ $\Omega$ ]通过的电流  $I$  [A]是相同的,所以

$$V = V_1 + V_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I = R I$$

所以它们的合成电阻  $R$  为

$$R = R_1 + R_2$$

当  $n$  个电阻串联时,合成电阻可表示为

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (1.51)$$

### ● 并联电路的合成电阻

图 1.52(b)所示的并联电阻,由于电阻  $R_1$ 、 $R_2$  上所加的电压相同,所以

$$I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) V = \frac{1}{R} V$$

故合成电阻  $R$  可用下式表示:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

当多个电阻并联时,合成电阻  $R$  与各个电阻之间的关系可用下式表示:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1.52)$$

## □ 相关知识 ● 倍率器与分流器

测量电压和电流时,为扩大量程所联接的电阻器分别称为倍率器和分流器。

倍率器

在图 1.52(a)中,设  $R_1$  为电压表的内电阻,与之串联的电阻  $R_2$  即为倍率器。用倍率器对全电压进行分压,可用于调节加在  $R_1$  上的电压。倍率器的倍率  $m$  可表示为

$$m = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1.53)$$

分流器

所谓分流器可如图 1.52(b)所示,设  $R_1$  为电流表的内阻,与之并联的电阻器  $R_2$  即为分流器。用分流器进行分流,可以调节流过  $R_1$  的电流大小。分流器的倍率  $n$  为

$$n = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (1.54)$$

### 例 题 电阻的串并联

图 1.53 中,合上开关 S 时的电流  $I$  为断开 S 时电流的 1.2 倍,求  $R$  的电阻值。

**答** 设开关 S 闭合时的电流与合成电阻分别为  $I_1$ 、 $R_1$ ,开关 S 打开时的电流与合成电阻分别为  $I_0$ 、 $R_0$ ,则

$$I_1 = 1.2 I_0 \quad (1.55)$$

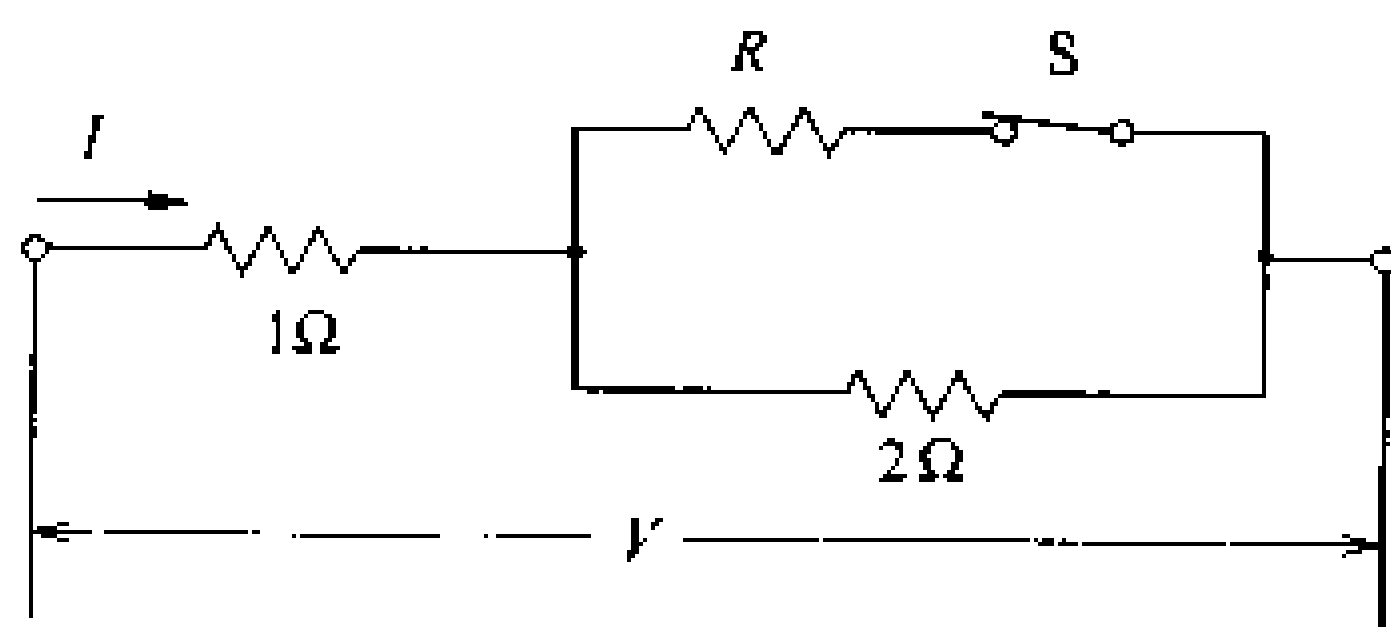


图 1.53 电阻的串并联

根据欧姆定律

$$I_1 = \frac{V}{R_1}, I_0 = \frac{V}{R_0} = \frac{V}{1+2}$$

将上两式代入(6)式,得  $R_1 = 2.5\Omega$ 。所以

$$\frac{1}{2.5-1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2}$$

求得:  $R = 6\Omega$

# 14 交流电

□ 要 点

交流电就是电流或电压的大小和方向均为变化的电流,它可用“大小、波形、变化速度、相位”等 4 要素表示。如果其中“波形”和“变化速度”均不变时,可用向量表示交流电,表示方法与计算方法都很方便。

□ 解 释 ● 交流电

交流电

如上所述,大小和方向均不随时间变化的电流称为直流电,而在图 1.54(a)~(c)所示图形中,电流的大小和方向等均随时间变化的称为交流电。

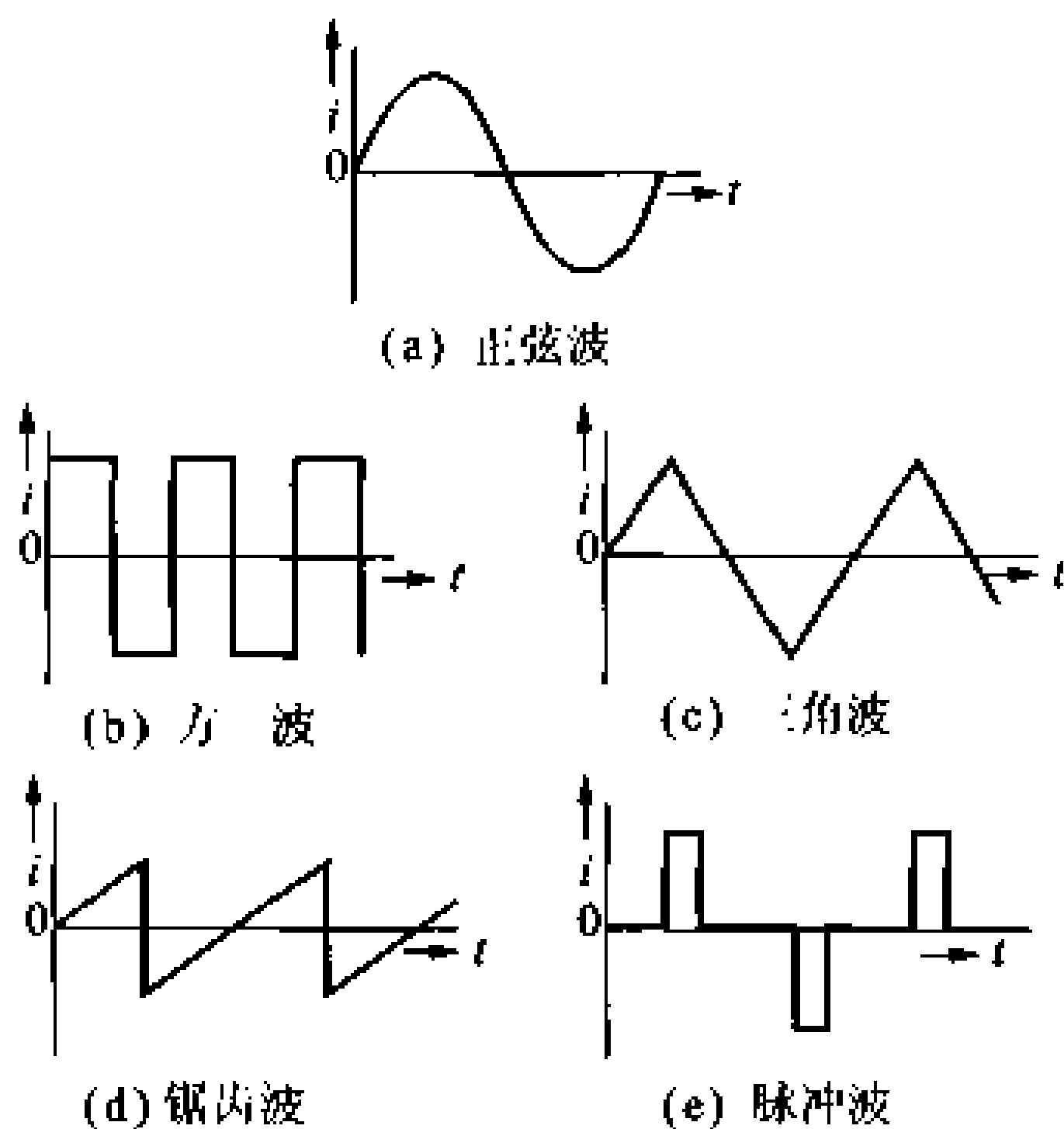


图 1.54 交流电的波形

正弦交流电  
非正弦交流电

在交流电中,图 1.54(a)所示的交流波形称为正弦交流电,图 1.54(b)~(e)所示的波形总称为非正弦交流电,或称畸变波交流电。非正弦交流电可以分解为图 1.55 所示的若干个大小和方向不同的正弦交流。为了分析交流电,研究正弦交流电的性质是最基本的内容。

● 交流电的大小(1)——瞬时值和最大值

瞬时值

由于交流电中电流和电压的大小是变化的,所以表示其大小的方法就有多种。图 1.56 是正弦交流电瞬时值曲线。瞬时值就是某时刻的大小,它表示电流和电压随时间的变化状况。用  $e$ 、 $v$ 、 $i$

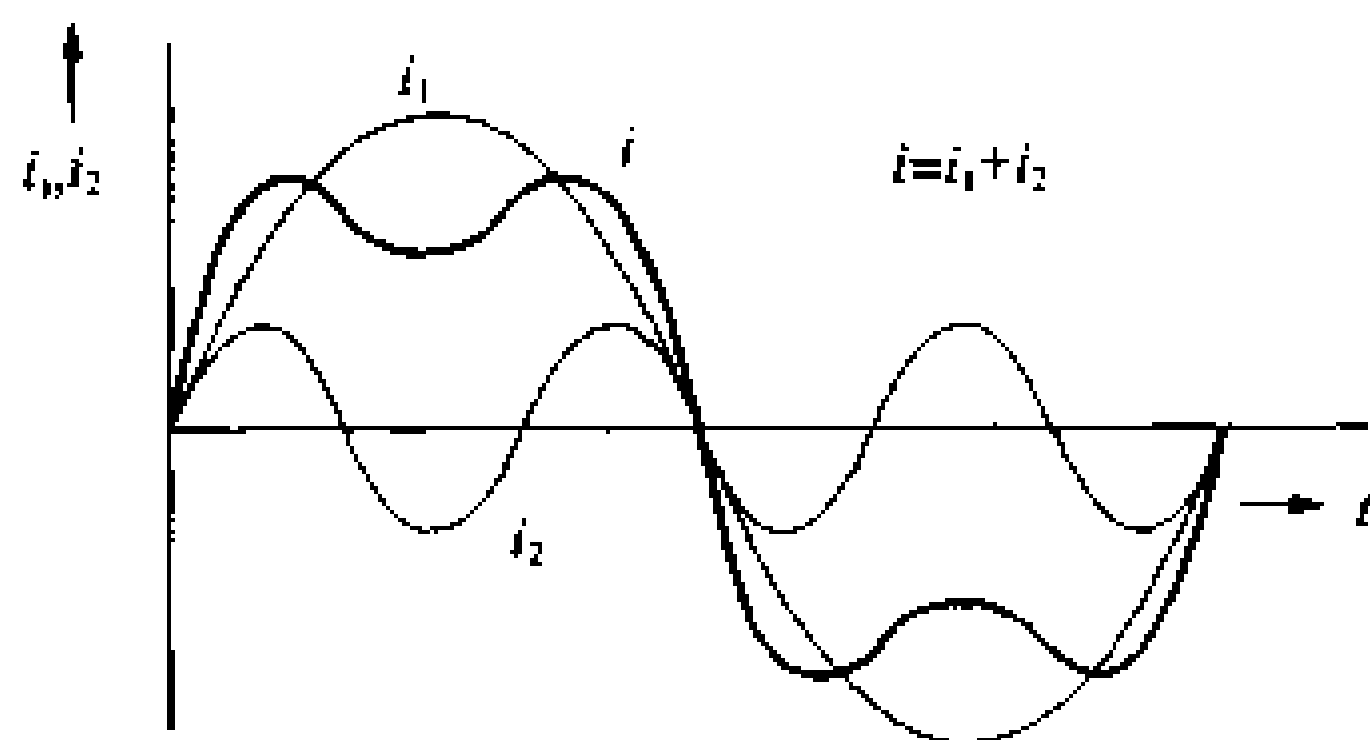


图 1.55 非正弦交流电的分解

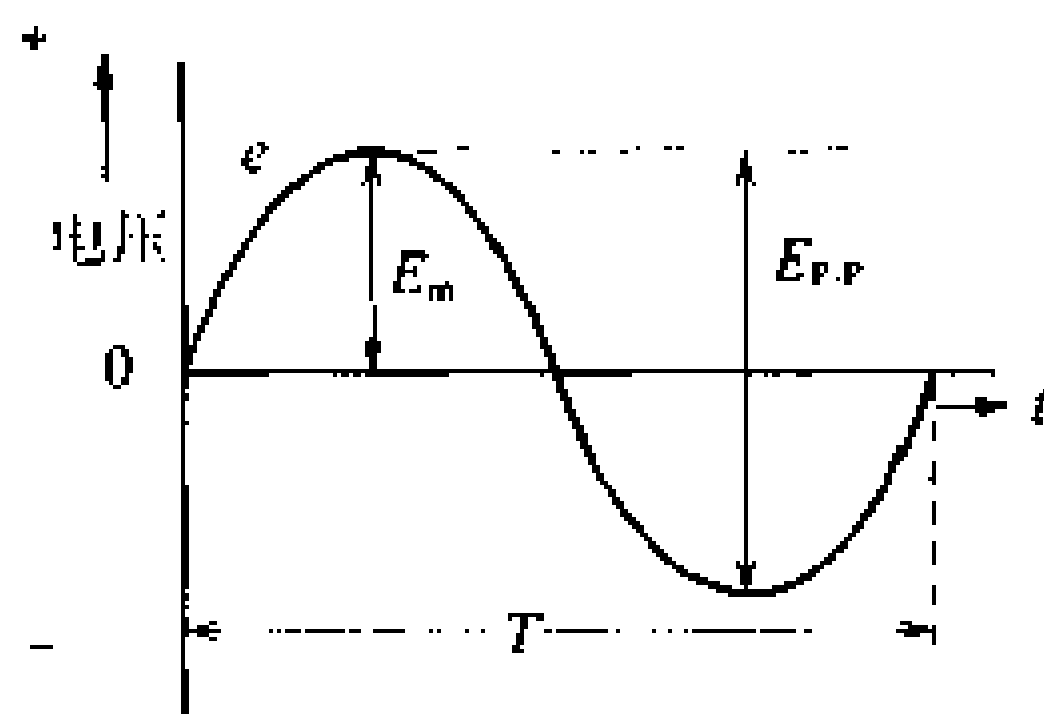


图 1.56 正弦交流电的波形

等小写字母表示。最大值  $E_m$  是瞬时值的最大值,峰间值  $E_{p-p}$  表示瞬时值中正峰值到负峰值之间的差值。

周期  
频率

波形重复一次所需的时间称为**周期**( $T$ ),每秒的周期数称为**频率** $f$ 。所以周期与频率的关系为

$$T = \frac{1}{f} [\text{S}], f = \frac{1}{T} [\text{Hz}] \quad (1.56)$$

### ● 交流电的大小(2)——平均值、有效值

平均值

**平均值**  $E_a$  是半个周期内瞬时值的平均值,在图 1.57 中可用  $(A \text{ 的面积}) / (\text{半周期})$  求得。在正弦交流电的情况下,平均值  $E_a$  和最大值  $E_m$  有以下的关系:

$$E_a = \frac{2}{\pi} E_m \quad (1.57)$$

有效值

**有效值**  $E$  表示与直流电具有同样做功能力的交流值,可用  $\sqrt{\text{瞬时值平方的平均值}}$  求取。在正弦交流电情况下进行计算,有效值与最大值之间的关系为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (1.58)$$

交流电的大小一般用有效值表示。例如家庭中插座的电压为

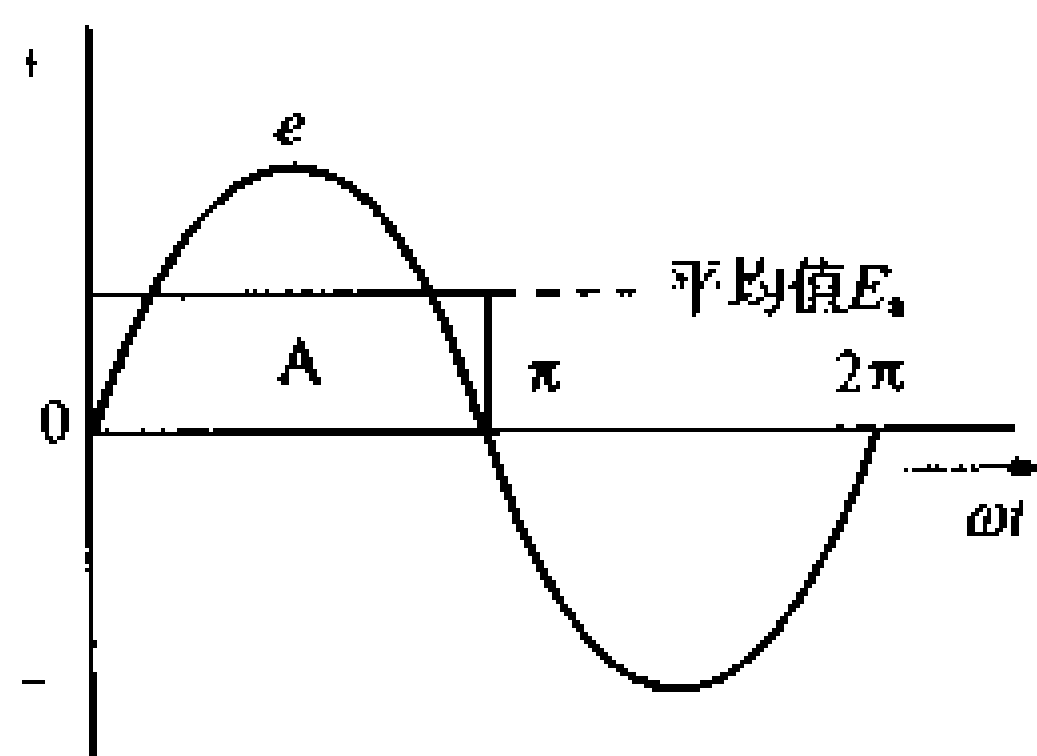


图 1.57 交流电的平均值

100V(220V)就表示正弦交流电压的有效值为 100V(220V)。从 (1.58) 式可知, 最大值为 141V(311V), 从 (1.57) 式可知, 其平均值为 90V(198V)。

附注: 我国与日本不同, 本小节括号中的数值为译者加入的中国家电数据。

### ● 大小和相位

对于交流电, 除频率所表示的“变化速度”、正弦波那样的“波形”、最大值等所表示的“大小”之外, 还有“相位”。

相位是表示波形的位移。如图 1.58 所示,  $e_1$  和  $e_2$  有时间差, 波形有错位。这种时间的位移称为相位差。可以说  $e_1$  比  $e_2$  超前  $\varphi[\text{rad}]$ , 也可以反过来说  $e_2$  比  $e_1$  滞后  $\varphi[\text{rad}]$ 。

相位  
相位差

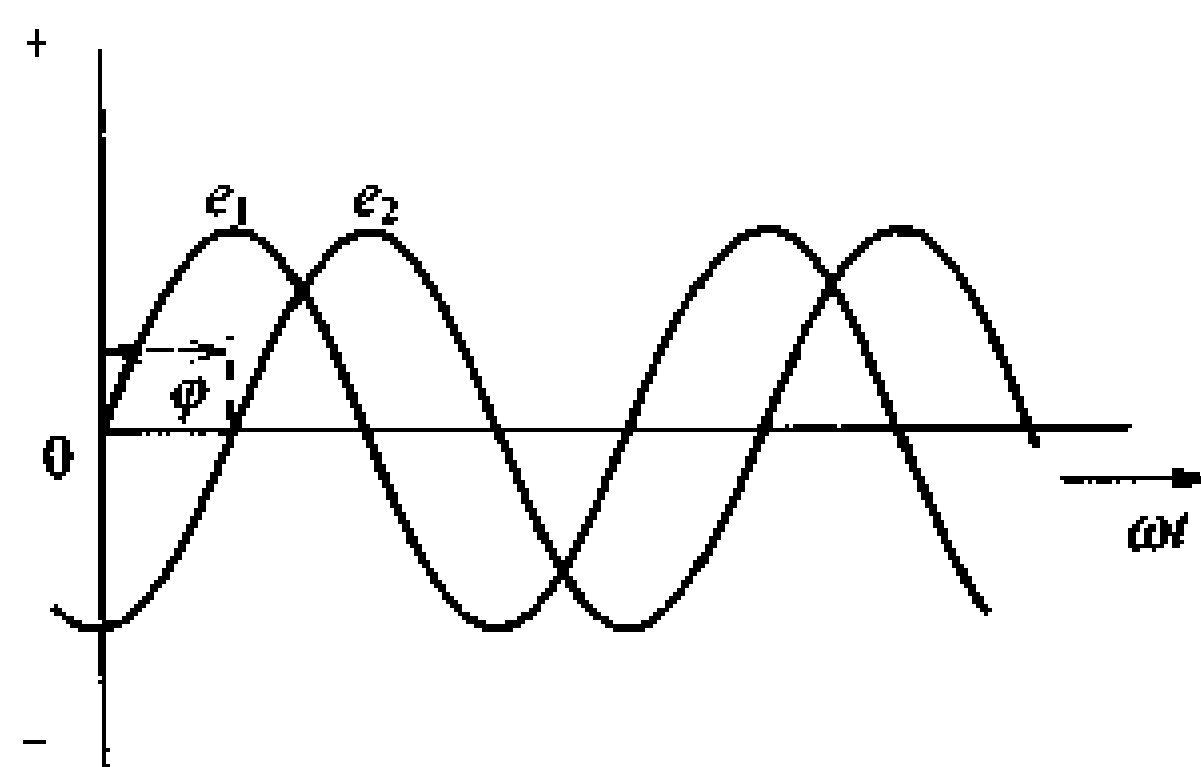


图 1.58 两个波形的相位差

在一般电路中, 多数情况下, 频率和波形不变。可以只考虑大小和相位两个因素。

### ● 用向量表示正弦交流

在大多数情况下处理交流的问题可以只考虑大小和相位两个因素, 所以可用向量来表示正弦交流电, 即用向量的大小表示交流

电的大小,用向量的方向表示交流电的相位。这样,可以将复杂交流电的计算进行简化,用向量图表示是很方便的。如图 1.59 所示,为了用向量表示交流电,可以采用向量图法和向量计算式表示法。另外在用向量表示交流时,规定用有效值表示交流的大小。

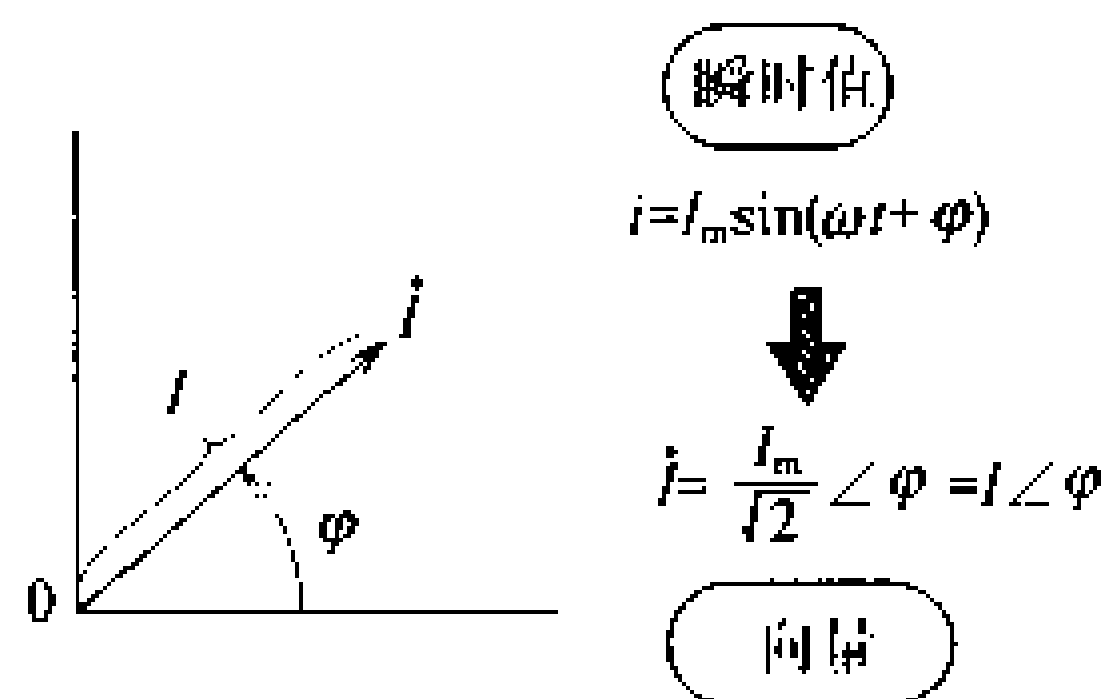


图 1.59 交流电的向量图

# 15 交流电的复数表示法

## □ 要 点

在交流电计算中,如果直接用瞬时值的表示式来处理正弦交流问题,就得用三角函数,这是非常复杂的。另外,对于复杂的电路如果用 1.14 节列举的向量图来处理也是非常麻烦的事。而用复数表示交流,使运算变成了代数运算,这就容易得多了。

## □ 解 释 ● 大小与相位的表示法

复数 实部  
虚部

设  $a, b$  为实数,  $j (= \sqrt{-1})$  为虚数,  $A = a + jb$  形式所表示的数为复数。式中  $a$  为实部,  $jb$  为虚部。如图 1.60 所示,如果用横轴表示实部,纵轴表示虚部,复平面上的点可以表示  $A = a + jb$ 。这里的  $|A|$  称为复数的模或者幅值,它表示交流电的大小。

$$|A| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1.59)$$

$\theta$  称为复数的幅角,表示交流电的相位。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (1.60)$$

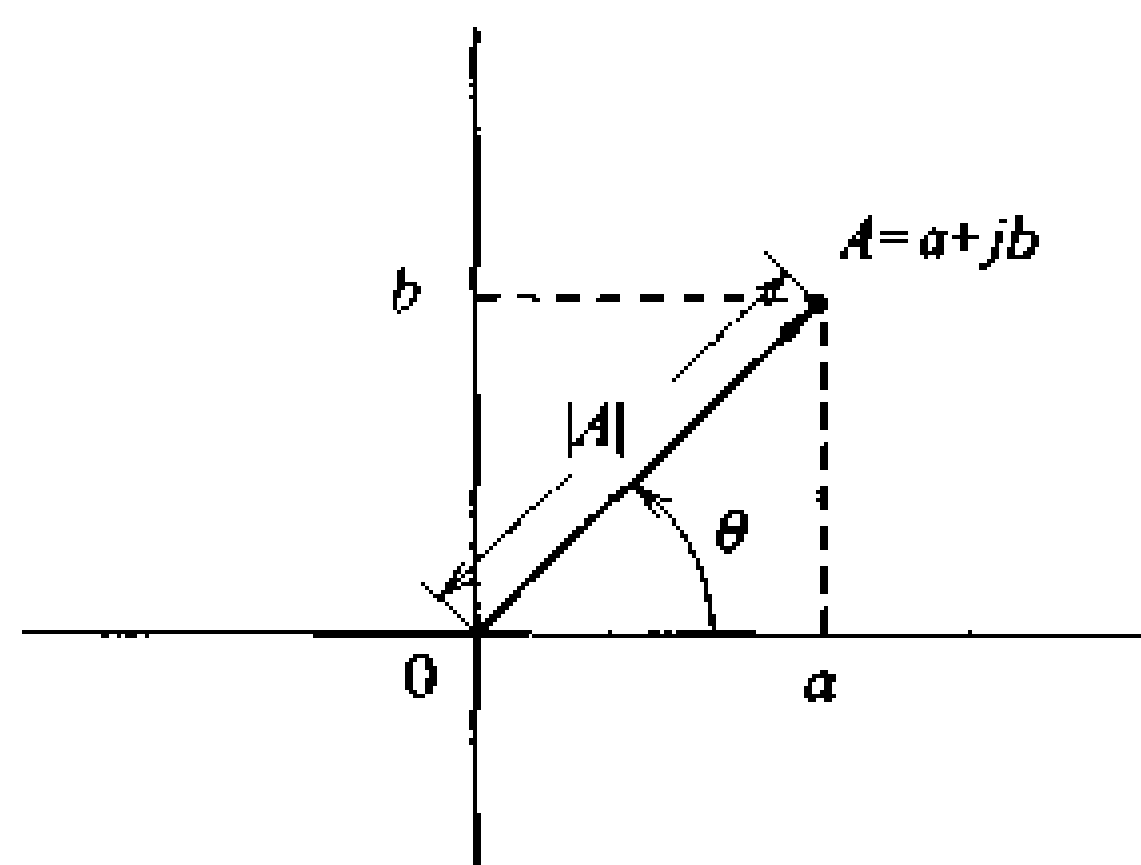


图 1.60 复数表示法

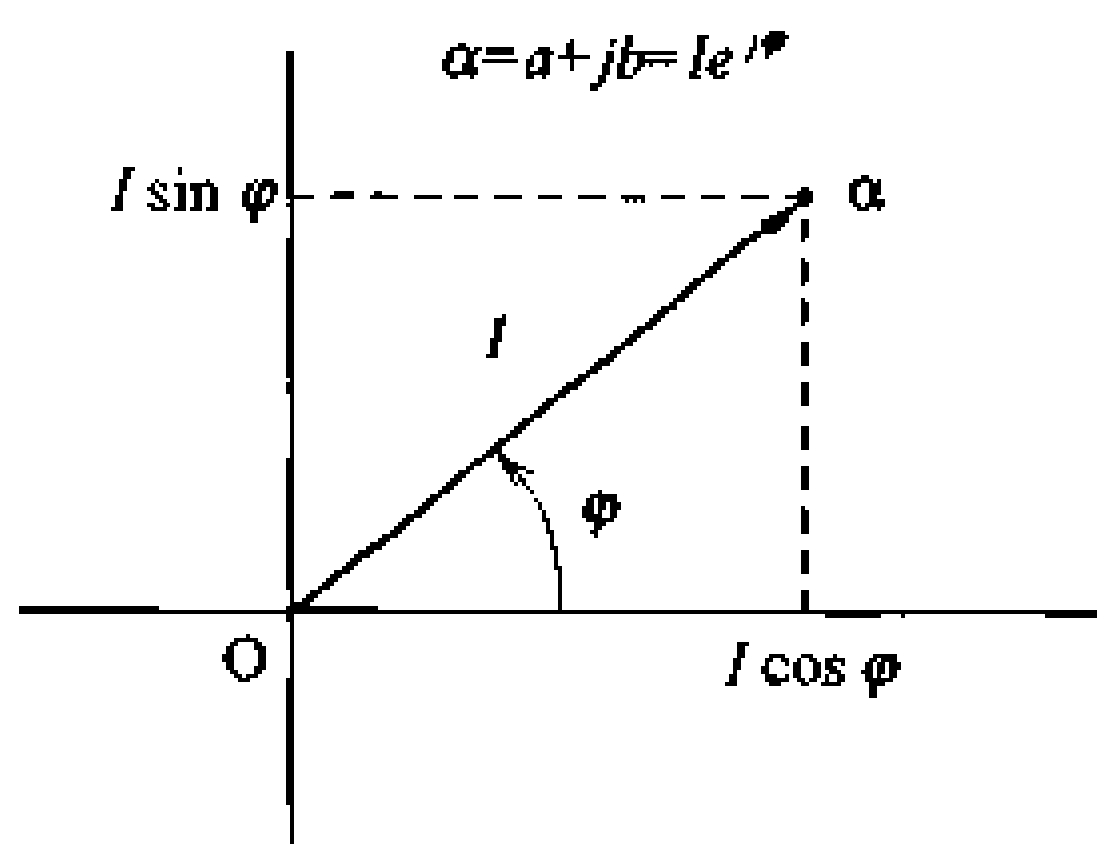


图 1.61 正弦交流电的复平面表示

## ● 为什么用复数表示

对正弦波这样的三角函数进行数学处理,用复数是很合适的。如图 1.61 所示,如果在复平面上表示正弦波的向量图,则  $\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi)$  所表示的正弦交流电可在直角坐标系中写成

$$\alpha = a + jb$$

利用线段  $O\alpha = I$  以及 X 轴(实轴)和  $O\alpha$  的夹角  $\varphi$ ,坐标上的点  $\alpha$  可表示为



$$\alpha = I \cos \varphi + j I \sin \varphi = I (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (1.61)$$

如将欧拉公式

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi \text{ 代入上式则有:}$$

$$\alpha = I e^{j\varphi} \quad (1.62)$$

该式为极坐标形式。复数的积和商可以采用指数法则进行计算,十分方便。式中,  $j$  使坐标上的向量旋转  $90^\circ$ , 适用于表示相位的变化。

## □ 相关知识 ● 欧拉公式的数学背景

对指数函数  $e^x$  展开, 即可得到:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!}$$

令式中  $x = j\psi$ , 则

$$e^{j\psi} = 1 + (j\psi) + \frac{(j\psi)^2}{2!} + \dots + \frac{(j\psi)^n}{n!} + \dots$$

另外, 如果展开  $\cos \psi$ 、 $\sin \psi$  则得到如下的幂级数

$$\cos \psi = 1 - \frac{\psi^2}{2!} + \frac{\psi^4}{4!} - \dots, \quad \sin \psi = \psi - \frac{\psi^3}{3!} + \frac{\psi^5}{5!} - \dots$$

因  $j^2 = -1$ , 所以

$$\begin{aligned} e^{j\psi} &= \left(1 - \frac{\psi^2}{2!} + \frac{\psi^4}{4!} - \dots\right) + j\left(\psi - \frac{\psi^3}{3!} + \frac{\psi^5}{5!} - \dots\right) \\ &= \cos \psi + j \sin \psi \end{aligned}$$

# 16 交流电路的 $R, L, C$

**要 点** 在交流电路中,对电路产生影响的主要元件为电阻  $R$ 、电感  $L$  和电容  $C$ 。 $L$  和  $C$  有改变交流相位的作用。与直流时的情况一样,这些元件的电流和电压的关系也符合欧姆定律。

**解 释** ● 大小和相位

电阻  $R$  起着阻碍交流电流流动的作用。其电阻的大小即为电阻值本身。如图 1.62 所示,电流与电压之间不产生相位差。

$$R = R \text{ } [\Omega] \quad (1.63)$$

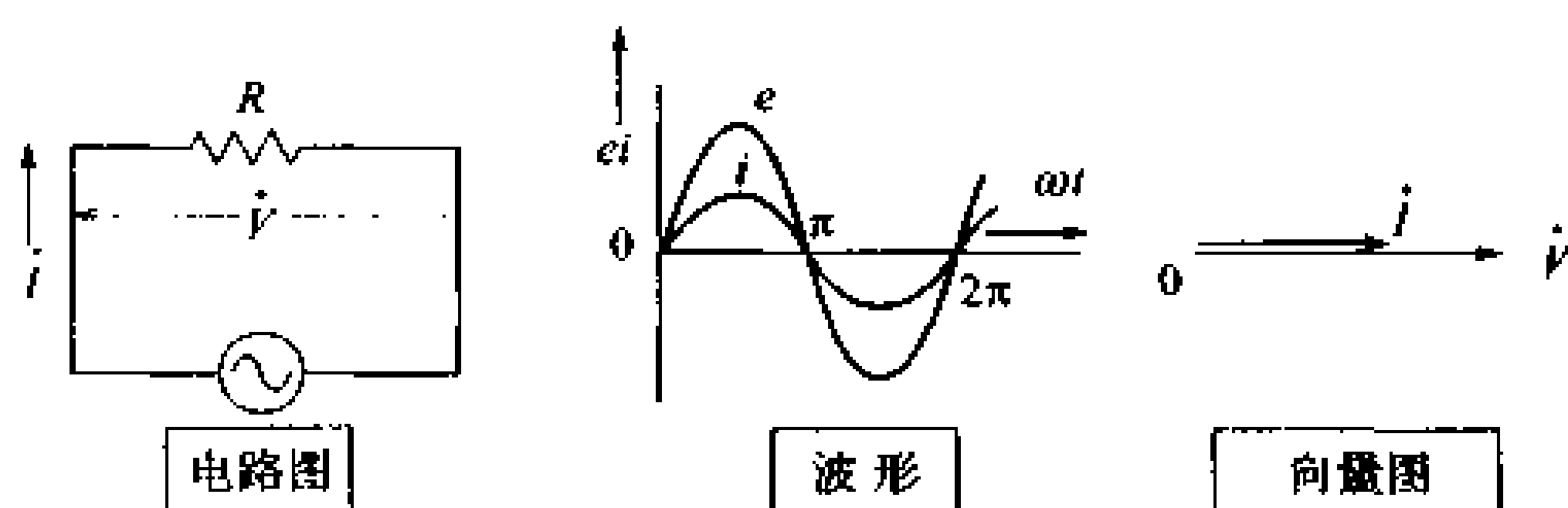


图 1.62 交流电路的  $R$

**感抗**

电感也阻碍交流电流的流动,其作用称为感抗  $X_L$ ,与电感的大小  $L$  [H]和频率  $f$  [Hz]成正比,设角频率  $\omega = 2\pi f$ ,则有

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \text{ } [\Omega] \quad (1.64)$$

如 1.6 节所述,由于线圈产生的感应电动势会阻碍电流的变化,所以电压上升不能使电流立刻增加,反之,电压下降也不能使电流立刻减少。所以电流的相位比电压的相位滞后  $\pi/2$  [rad] ( $90^\circ$ ),如图 1.63 所示。

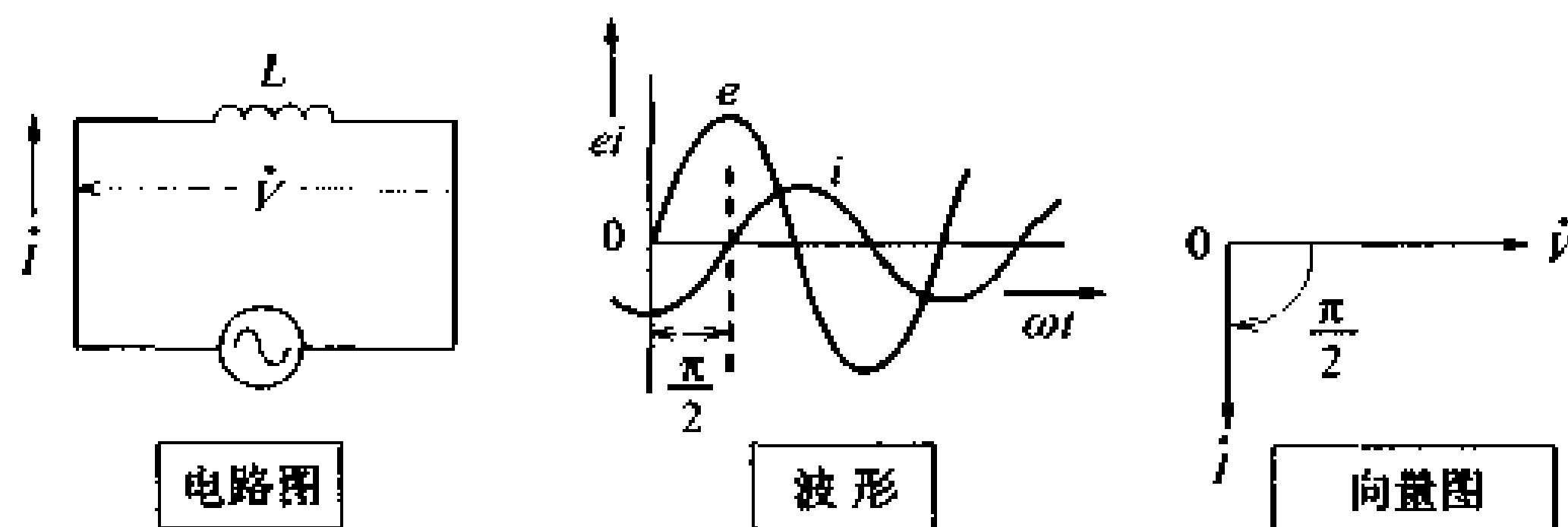


图 1.63 交流电路的  $L$

## 容抗

电容也会阻碍电流变化,其作用称为容抗  $X_C$ ,大小与电容  $C$  的大小和频率  $f[\text{Hz}]$  成反比:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega] \quad (1.65)$$

电容器在电压升高时积蓄电荷,电压降低时释放电荷。由于电流是这种电荷运动产生的,所以电流的相位超前于电压  $\pi/2$  [rad] ( $90^\circ$ ),如图 1.64 所示。

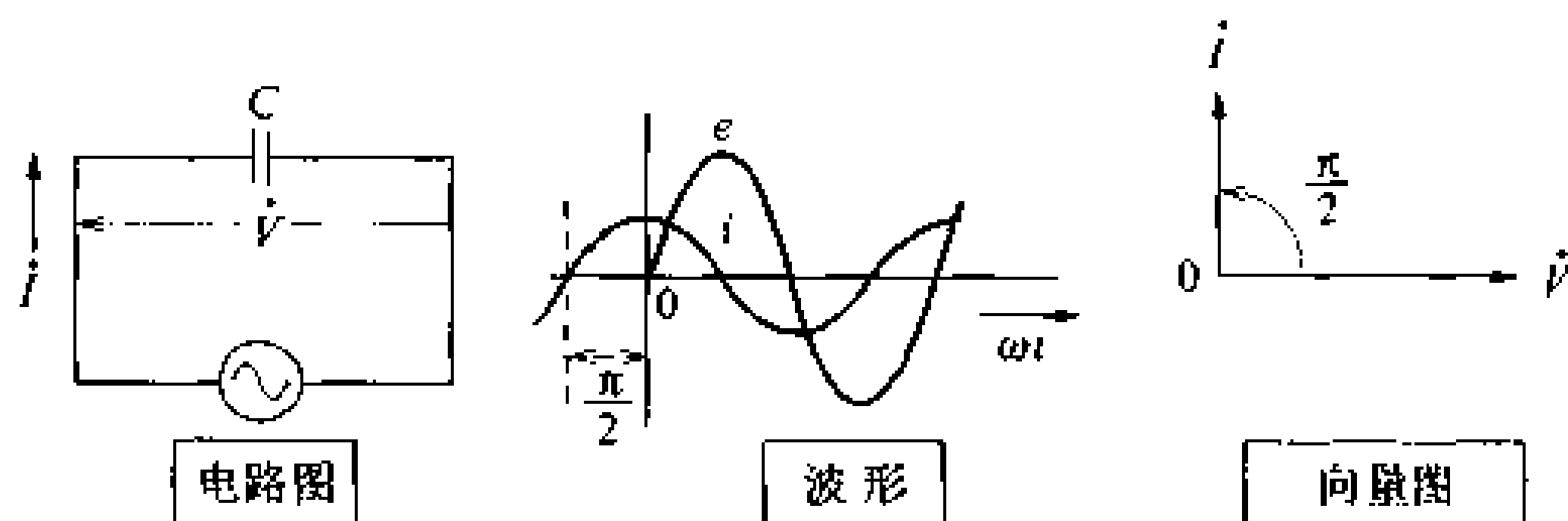


图 1.64 交流电路的 C

### ● 复数表示法

## 阻抗

在交流电路中,阻碍电流流动的参数称为阻抗  $Z$ 。如以电压为基准,用复数表示电路中各元件的阻抗,可分别表示如下。

由于电阻不会使相位发生改变,所以在复平面上也没有变化,故有

$$Z = R \quad (1.66)$$

因为电感  $L$  使电流的相位滞后  $\pi/2$  [rad], 所以

$$Z = jX_L = j\omega L \quad (1.67)$$

由于电容  $C$  使电流的相位超前  $\pi/2$  [rad], 所以

$$Z = -jX_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (1.68)$$

### ● 交流电路的欧姆定律

交流电路的电压  $\dot{V}$  与阻抗  $Z$ 、电流  $\dot{I}$  的关系符合欧姆定律:

$$\dot{V} = Z \dot{I} \quad (1.69)$$

同样,电压  $\dot{V}$ 、电流  $\dot{I}$  和感抗  $X_L$  及容抗  $X_C$  之间欧姆定律也成立:

$$\dot{V} = X_L \times I, \quad \dot{V} = X_C \times I \quad (1.70)$$

交流电路中各元件串联时,由于流过各元件的电流相同,则电路的阻抗  $Z$ 、电压  $\dot{V}$ 、相位  $\varphi$  的关系可用图 1.65 表示。

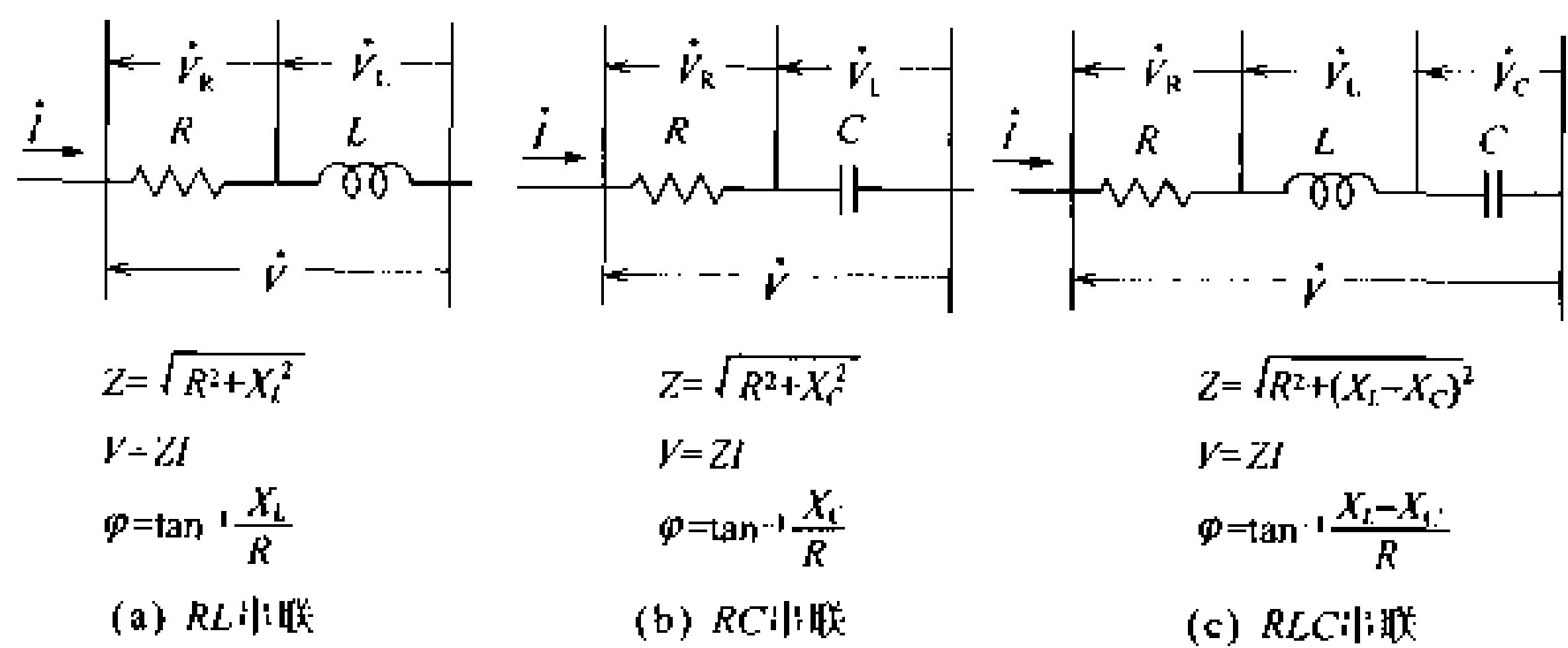


图 1.65 交流串联电路

交流电路中各元件并联时,由于加在各个元件的电压相同,故电路的阻抗  $Z$ 、电流  $\dot{I}$ 、相位  $\varphi$  的关系可用图 1.66 表示。

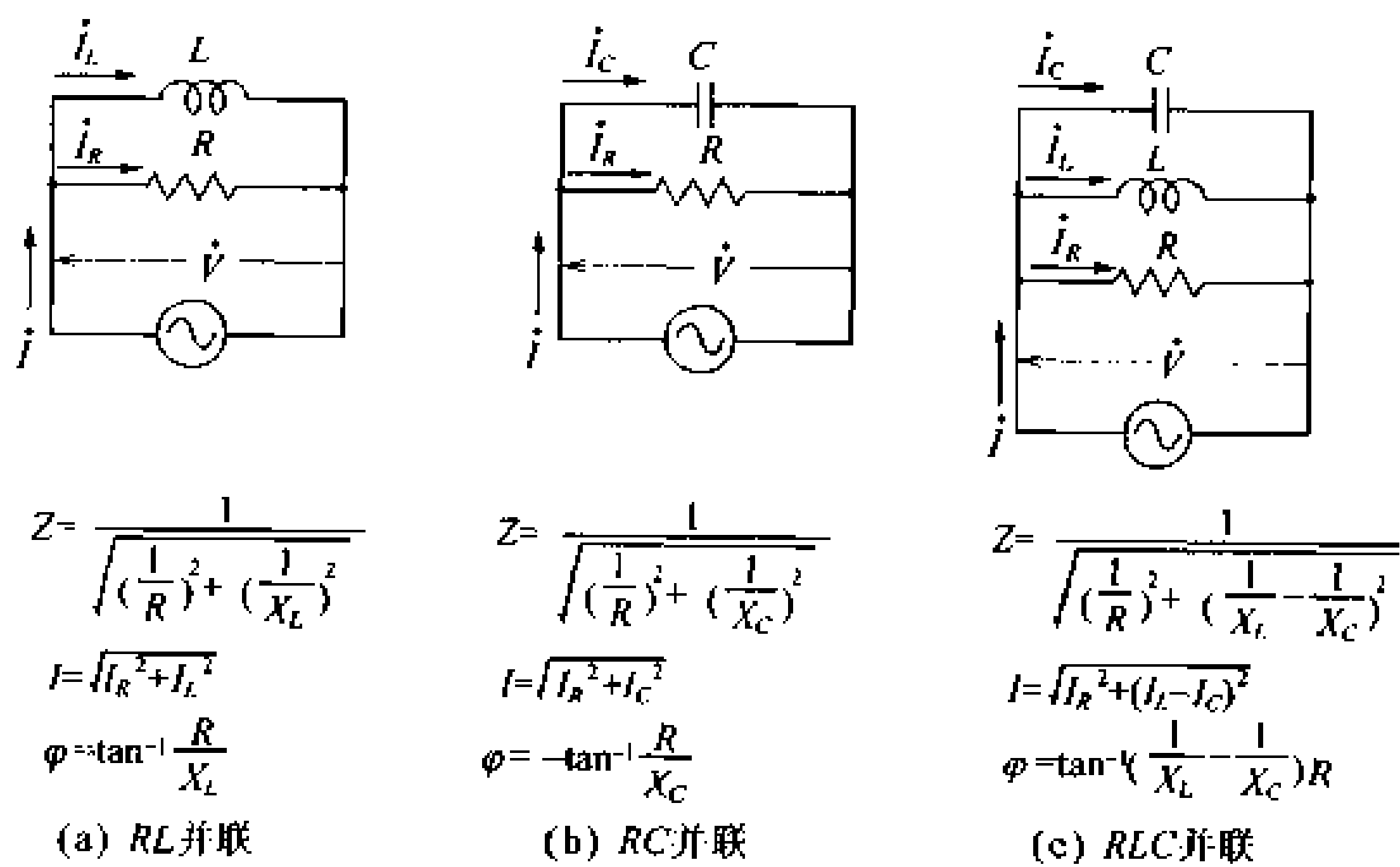


图 1.66 交流并联电路

☐ 相关知识 ● 阻抗和导纳

设(1.69)式中阻抗  $Z$  的倒数为  $Y$ ,则

$$\dot{I} = Y \dot{V} \tag{1.71}$$

导纳

式(1.71)中的  $Y$  称为导纳, 单位为西门子  $[S]$ 。阻抗  $Z$  的大小表示电流难以通过的程度, 而导纳  $Y$  则表示电流容易通过的程度。

如用电阻  $R$  和电抗  $X$  以复数法表示  $Z$ , 则  $Z$  为

$$Z = R + jX \quad (1.72)$$

用复数表示  $Y$ , 可表示为

$$Y = G - jB \quad (1.73)$$

电导 电纳

这里实部  $G$  称为电导, 虚部  $B$  称为电纳

## 应用知识 简单滤波电路

从既含有交流分量又含有直流分量的信号中仅选取出直流分量, 或仅选取出某个频率的信号, 这种电路称为滤波电路。图 1.67 为其中一例。利用  $L$  和  $C$  的作用阻止交流分量,  $R$  上是已除去大部分交流分量的直流电压。

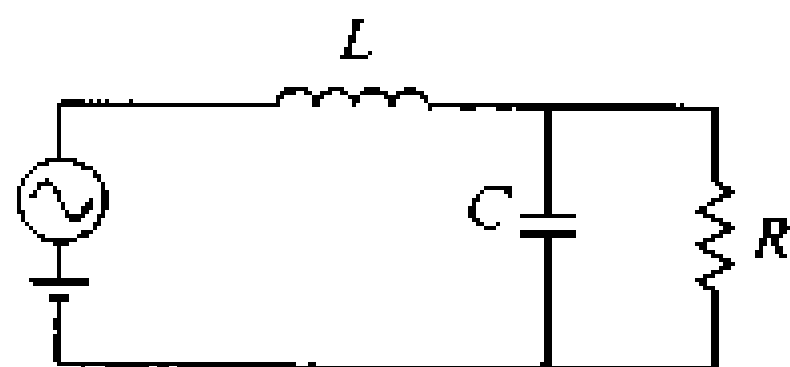


图 1.67 简单滤波电路

## 例 题 交流电路的 $R$ 和 $L$

在电阻与电抗串联的电路中, 如加  $50V$  直流电压, 则有  $12.5A$  的电流通过, 如加  $100V$  交流电压, 则电流为  $20A$ 。求电路的感抗为多少?

**答** 电路的电阻为

$$R = \frac{V}{I} = \frac{50}{12.5} = 4\Omega$$

从  $I = \frac{V}{Z}$  可得  $20 = \frac{100}{Z}$ , 所以  $Z = 5\Omega$

因  $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ ,  $5 = \sqrt{4^2 + X_L^2}$  所以  $X_L = 3\Omega$

# 17 谐振电路

**要 点** 在有电感  $L$  和电容  $C$  两种元件的电路中,随  $L$  和  $C$  值的变化会产生某种电振荡。当振动频率等于电源的频率时,产生电路谐振。

**解 释** ● 串联谐振电路

图 1.68(a)的  $RLC$  串联电路中,当  $X_L = X_C$  时,电路发生谐振, $L$  和  $C$  的作用相互抵消。于是,如图 1.68(b)所示,电路阻抗  $Z=R$ ,电流  $i$  达到最大值。此时电源的频率称为谐振频率,可用下式表示:

谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad (1.74)$$

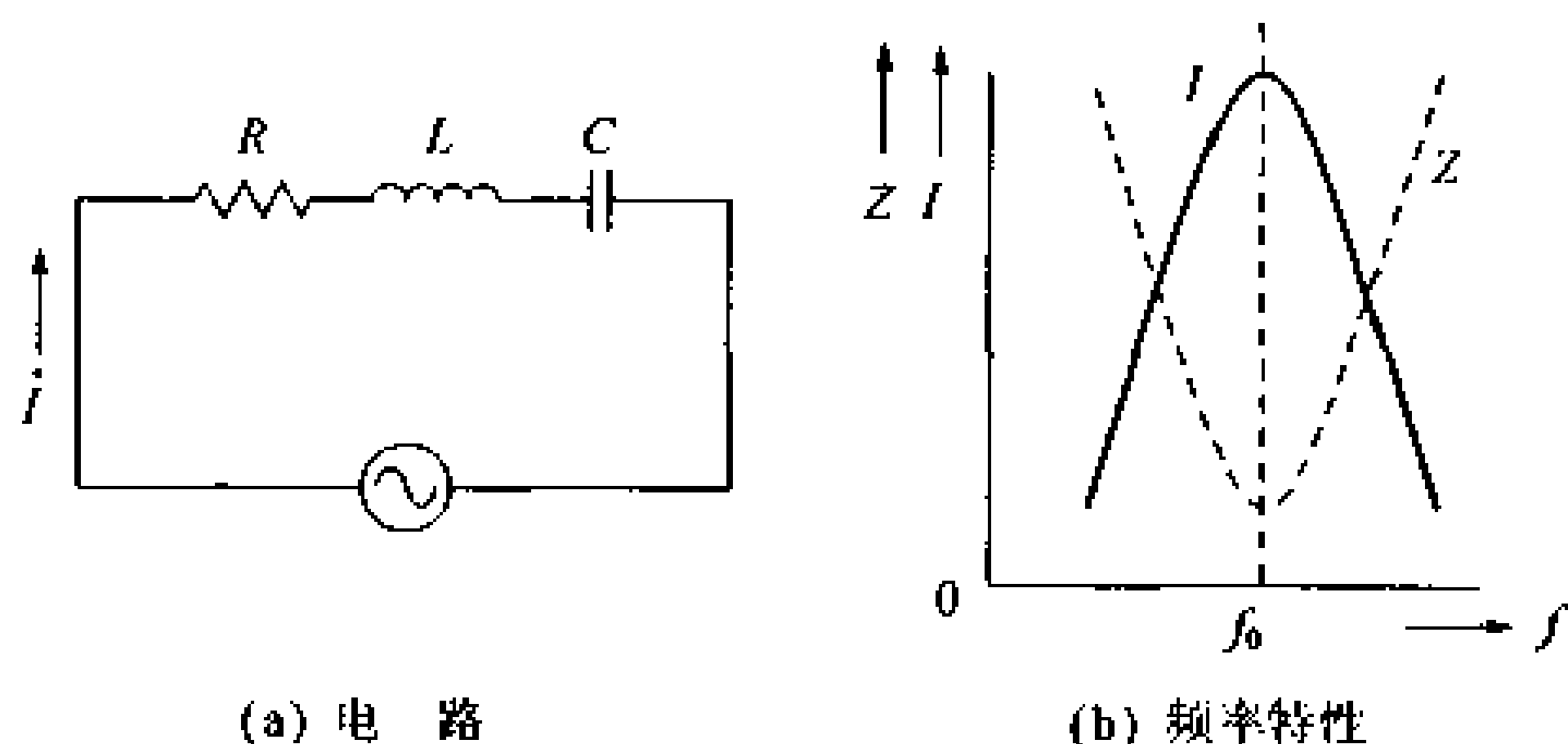


图 1.68 串联谐振电路

这里,我们把谐振时  $L$  或  $C$  上的电压与电源电压之比称为  $Q$  值, $Q$  值可用下式表示:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.75)$$

$Q$  值越大,图 1.68(b)的谐振曲线就越尖锐,电路的频率选择性越好。也就是说,谐振电路的  $Q$  值可表示电路的品质。

● 并联谐振电路

在图 1.69(a)的  $LC$  并联电路中,当  $X_L = X_C$  时,电路谐振, $I_C$  和  $I_L$  相互抵消。于是电路的阻抗达到最大值,电流  $I$  为最少,如图 1.69(b)所示。此时电源的频率称为谐振频率  $f_0$ ,其大小可表示为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \text{ [Hz]} \quad (1.76)$$

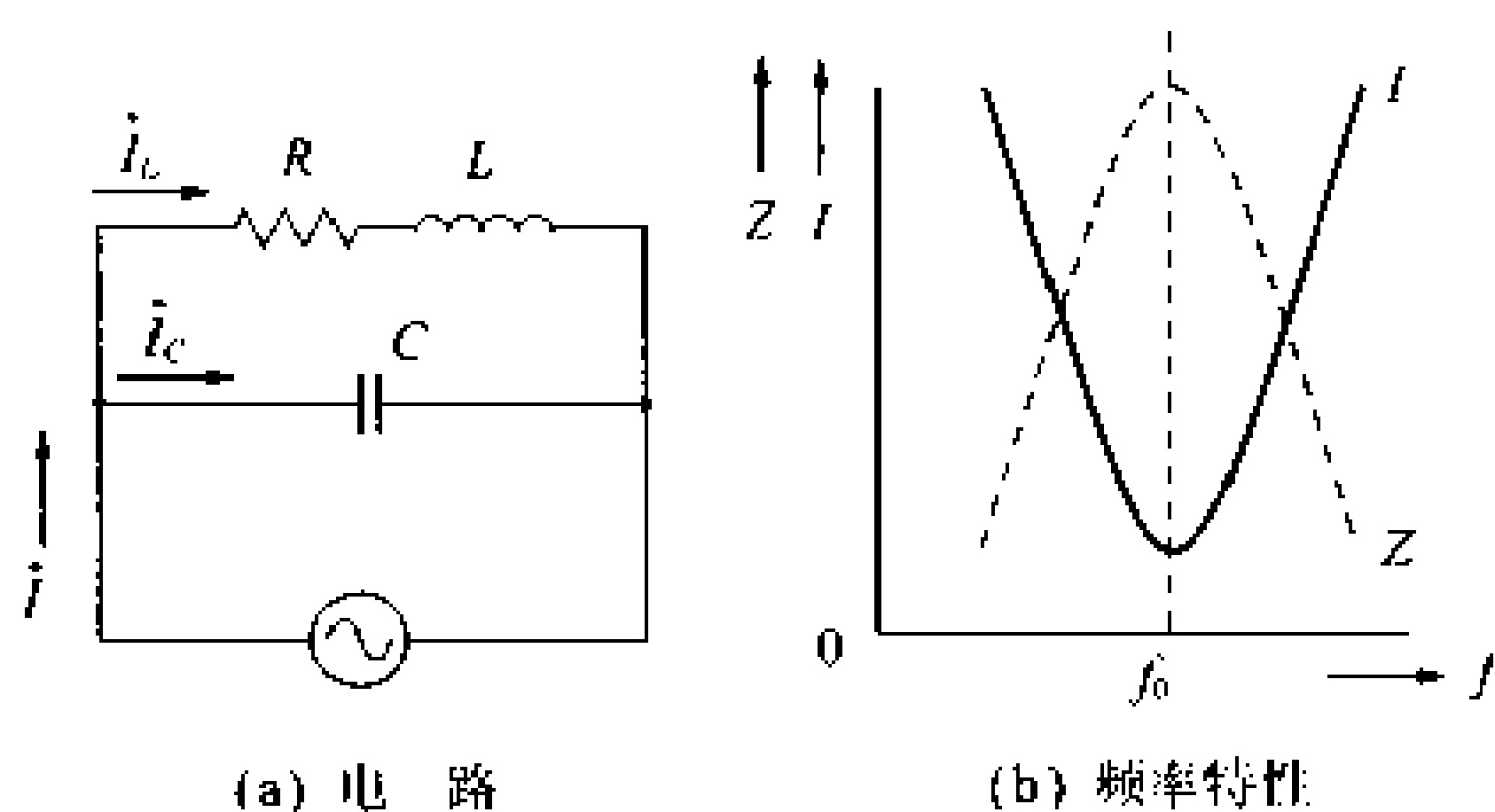


图 1.69 并联谐振电路

上式中,  $R$  远小于  $X_L$  时, (1.76) 式就与 (1.74) 式相同。

## 应用知识 调谐电路

图 1.70(a) 的收音机调谐电路与图 1.70(b) 的  $RLC$  串联电路等效。改变  $C$  使电路与接收频率谐振。于是  $\dot{V}_C$  增大, 找到接收信号。

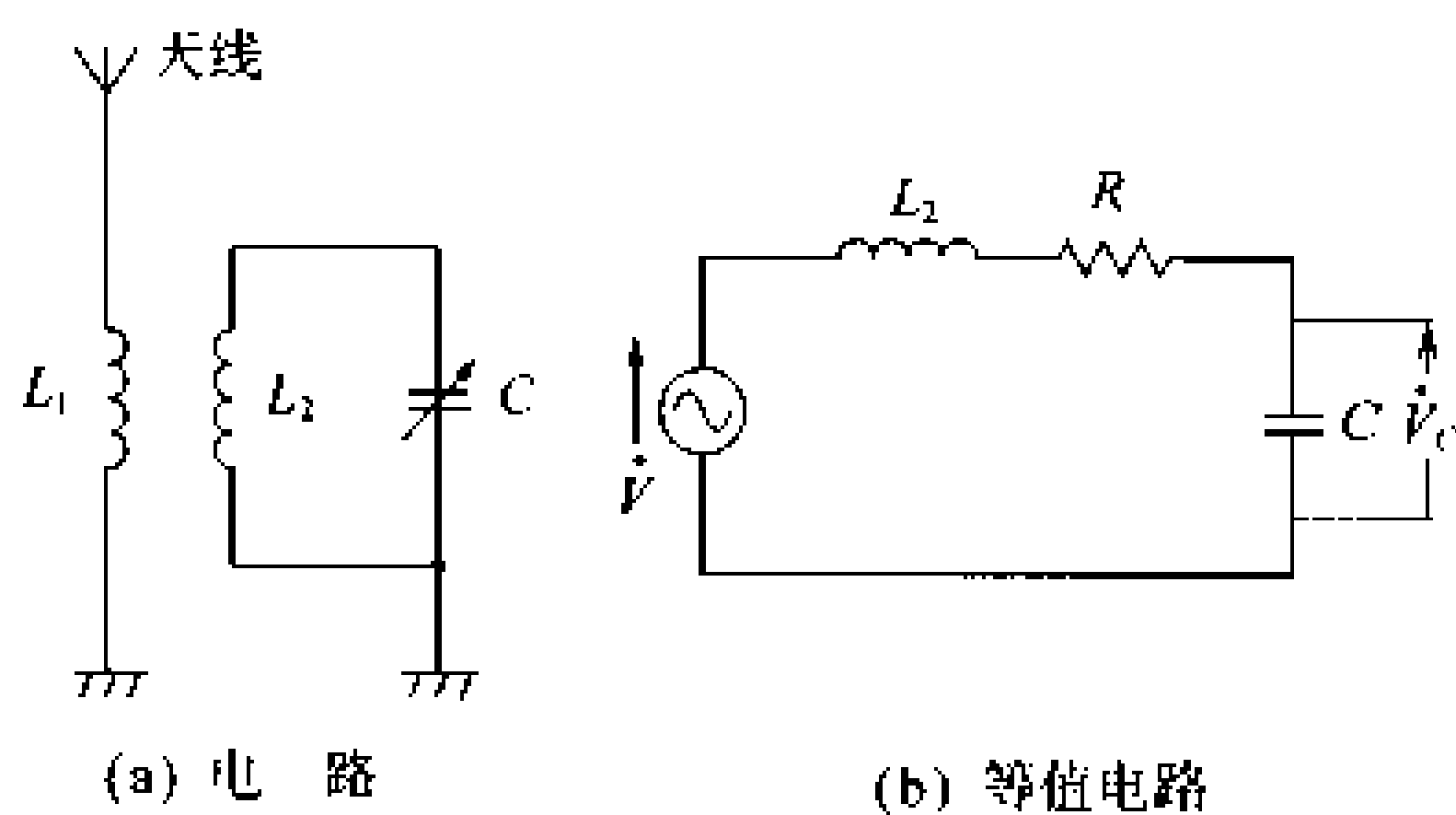


图 1.70 调谐电路

# 18 基尔霍夫定律

□ 要

点

基尔霍夫定律是关于电路节点与回路的定律,在求解复杂电路的电流时经常使用。基尔霍夫定律分为基尔霍夫电流定律(第一定律)和基尔霍夫电压定律(第二定律)。

□ 解

释

## ● 基尔霍夫电流定律(第一定律)

该定律为“流入任意节点的电流之和必等于流出该节点的电流之和”。在图 1.71 的电路中,我们来看节点 a,从设定的电流方向可以得到下式

$$\begin{array}{ccc} I_1 + I_2 & = & I_3 \\ \text{(流入的电流)} & & \text{(流出的电流)} \end{array} \quad (1.77)$$

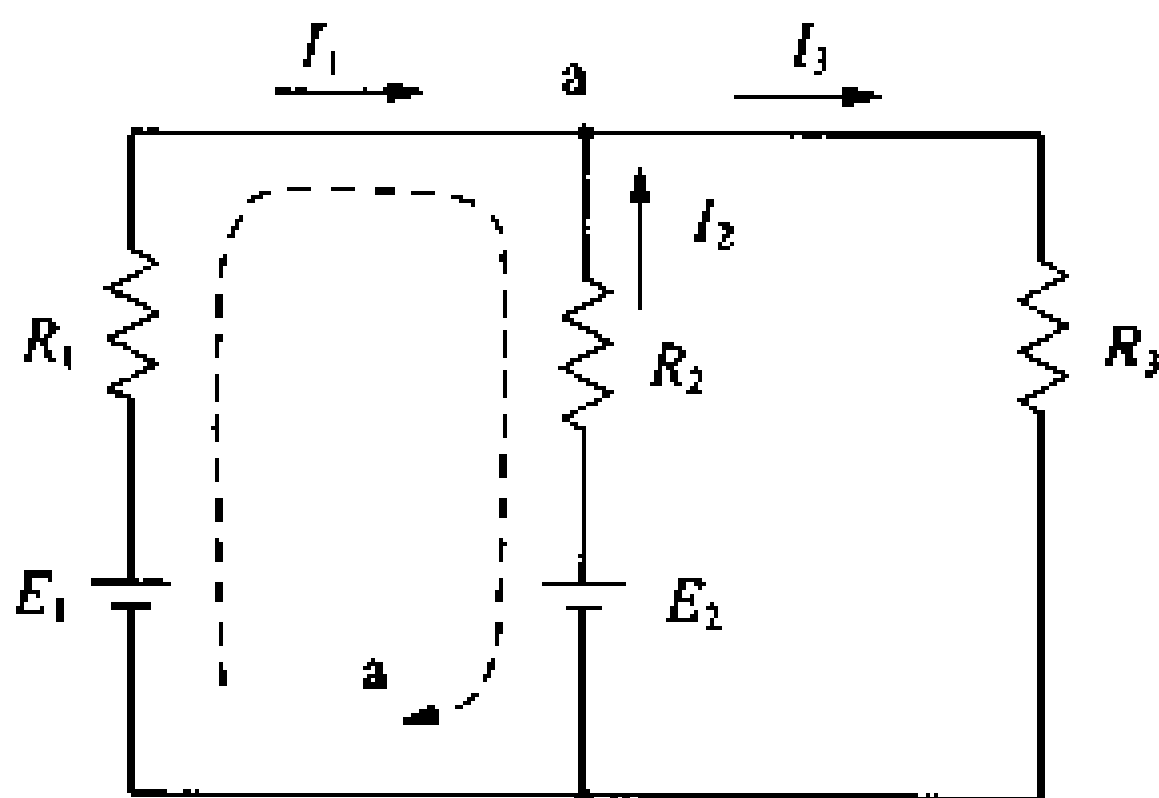


图 1.71 节点与回路

## ● 基尔霍夫电压定律(第二定律)

该定律为“任一闭合回路内的电动势之和等于电压降之和”。现在来看图 1.71 的回路 a,沿闭合回路的方向和假定的电流方向,可得下式:

$$\begin{array}{ccc} E_1 - E_2 & = & R_1 I_1 - R_2 I_2 \\ \text{(电动势之和)} & & \text{(电压降之和)} \end{array} \quad (1.78)$$



## 选修知识



### 基尔霍夫定律的使用方法

- ① 设定各支路的电流方向。
- ② 利用基尔霍夫第一定律对节点列方程。
- ③ 所有支路必须至少利用一次来选择闭合回路。利用基尔霍夫第二定律对各回路列方程。



- ④ 解①、②项所建立的方程,求出各支路电流。  
 ⑤ 如果求得的电流为负值,则说明实际的电流方向与设定的电流方向相反。

## □ 相关知识 ● 叠加定理

### 叠加定理

利用基尔霍夫定律的计算过程中,必须解联立方程,往往使计算变得复杂化,如果利用叠加定理进行计算就很方便,即“在包含多个电动势的网络中,各支路电流等于各电动势单独作用所产生的电流之和”。

图 1.71 的电路中,可分成包含各不同电动势的电路,如图 1.72(a)和图 1.72(b),分别求出各个电路的电流。然后再求图 1.72(c)所示电路电流的代数和。

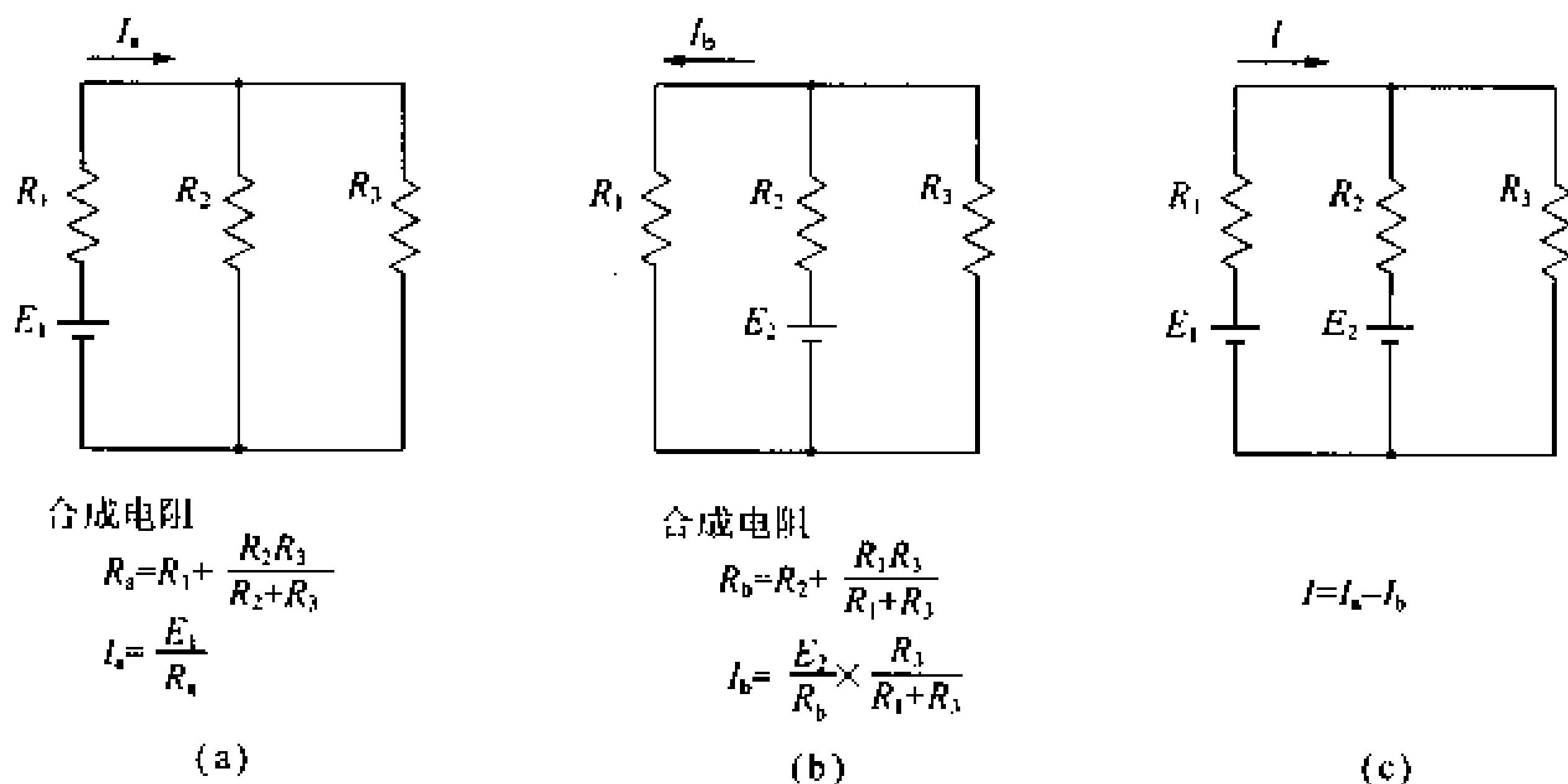


图 1.72 叠加定理

## ■ 例题 基尔霍夫定律

图 1.71 中设  $E_1 = 4\text{V}$ ,  $E_2 = 2\text{V}$ ,  $R_1 = 0.25\Omega$ ,  $R_2 = 0.1\Omega$ ,  $R_3 = 0.1\Omega$ , 求  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  各为多少?

**答** 从(1.77)式可得,  $I_1 + I_2 = I_3$

从(1.78)式可得,  $4 = 0.25I_1 + 0.1I_3$ ,  $2 = 0.1I_2 + 0.1I_3$

解方程,得:  $I_1 = 10\text{A}$ ,  $I_2 = 5\text{A}$ ,  $I_3 = 15\text{A}$

# 19 戴维宁定理

□ 要点

在含有多个电源和阻抗的网络中,为求出某特定支路流过的电流,可以应用戴维宁定理。设支路断开时端子之间的电压为  $V_0$ ,入端阻抗为  $Z_0$ ,则流过支路阻抗  $Z_1$  的电流为

$$I = \frac{V_0}{Z_0 + Z_1}$$

□ 解释

● 无源电路

有源器件  
无源器件  
无源电路

电路按其性质有各种分类方法,如果着眼于电路的构成,三极管、二极管之类的元件只要供给电源就能起到放大和整流作用,这种元件称为有源器件。而电阻、电感、电容等只能消耗或储存外部所提供的能量,这种元件称为无源器件。而把由无源器件和电源所构成的电路称为无源电路。

在无源电路中,欲求图 1.73(a)所示网络中的某支路电流时,可以先转换成图 1.73(b)的简化电路再来求解。

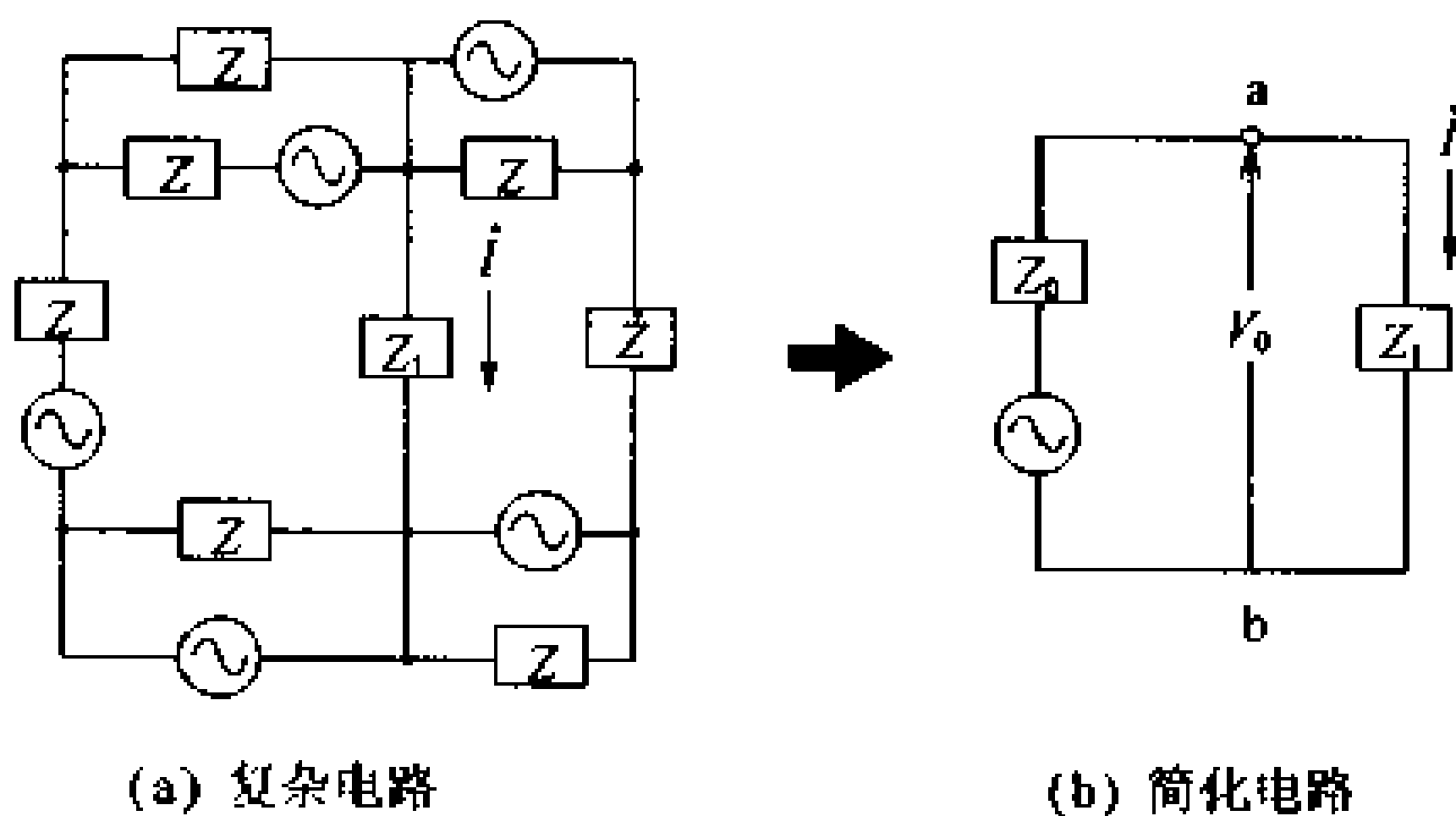


图 1.73 无源电路

● 输入和输出端阻抗

图 1.74 中,为了用戴维宁定理求输入端的电流  $I_1$ ,可以去掉信号源断开 a-b 间,再求电路的阻抗。这个阻抗称为输入阻抗。

如要求图 1.74 输出端的电流  $I_2$ ,可以不考虑负载,从 c-d 断开,求出从 c-d 看往电路一侧的电阻。该阻抗称为输出阻抗。

● 戴维宁定理

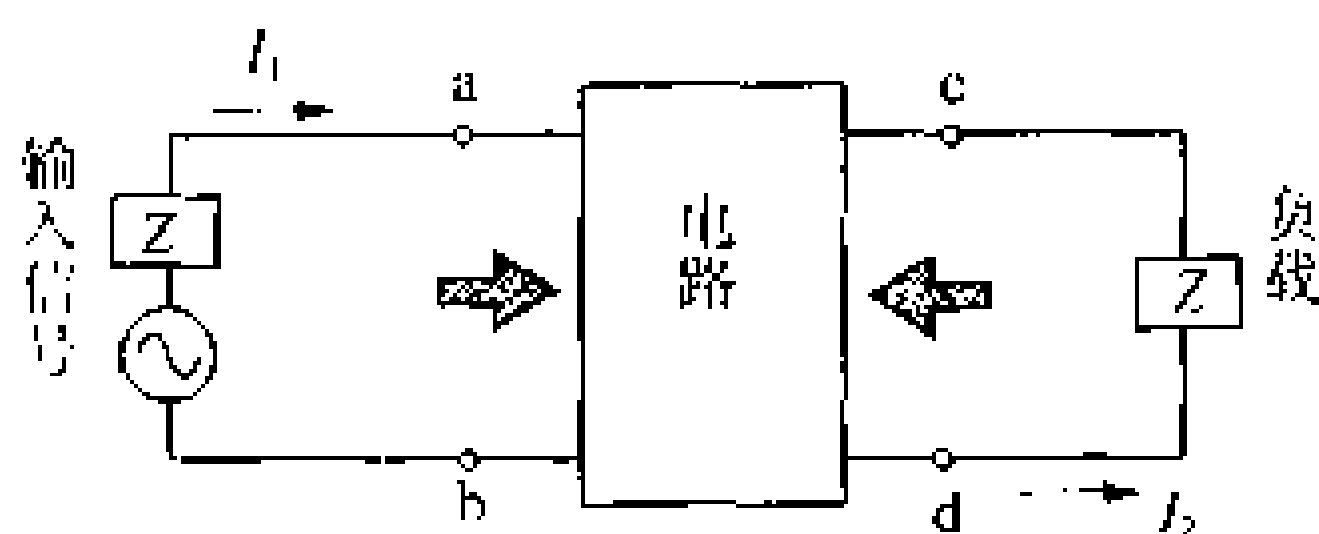


图 1.74 输入、输出阻抗

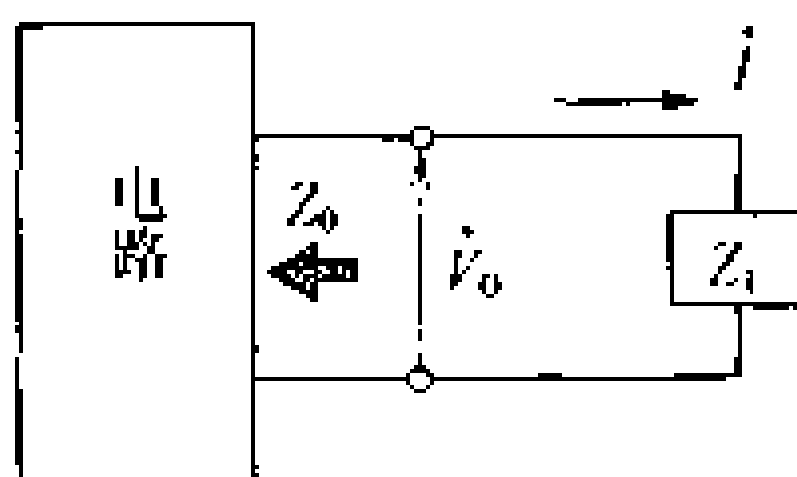


图 1.75 戴维宁定理

图 1.75 的电路中,设端子之间的电压为  $\dot{V}_0$ ,从此处看到的电路阻抗为  $Z_0$ 、流过阻抗  $Z_1$  支路的电流  $\dot{i}$  可用下式表示:

$$\dot{i} = \frac{\dot{V}_0}{Z_0 + Z_1}$$

### 戴维宁定理

这个关系是戴维宁发现的,称为戴维宁定理。

### ● 戴维宁定理的用法

例如,为求得流过图 1.76(a)电路中  $Z_1$  的电流,可以将它转换成图 1.76(d)的电路。

(1) 求开路电压:先断开  $Z_1$ , a-b 开路时的开路电压  $\dot{V}_0$ 。如图 1.76(b)所示。

(2) 求内部阻抗:断开  $Z_1$ ,将电路的电源短路,从 a b 看到的内部阻抗  $Z_0$  示于图 1.76(c)。

(3) 根据戴维宁定理求电流  $\dot{i}$ 。

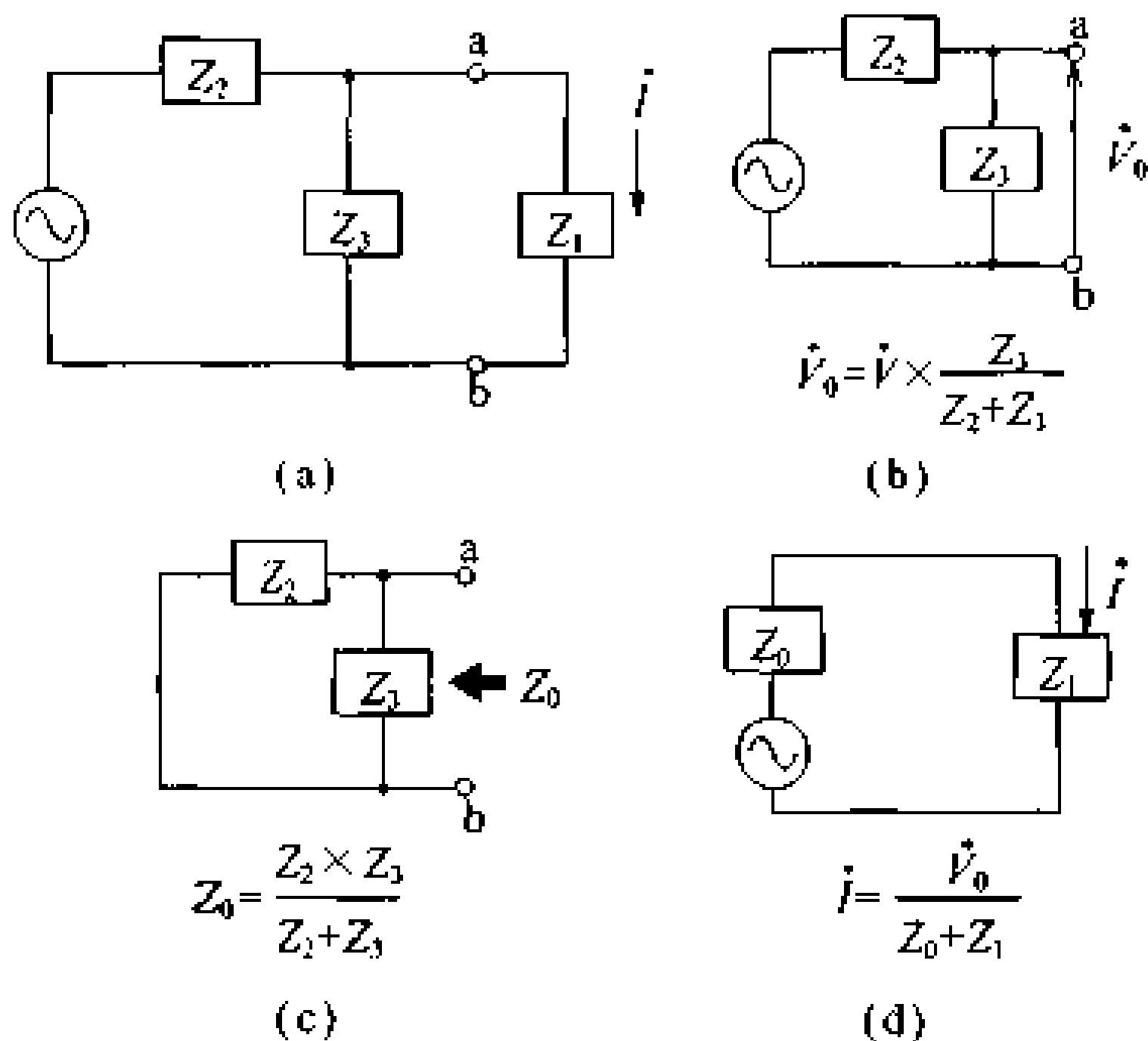


图 1.76 戴维宁定理的用法

# 例 题

戴维宁定理

求图 1.77 电路中的电流  $\dot{I}$  为多少?

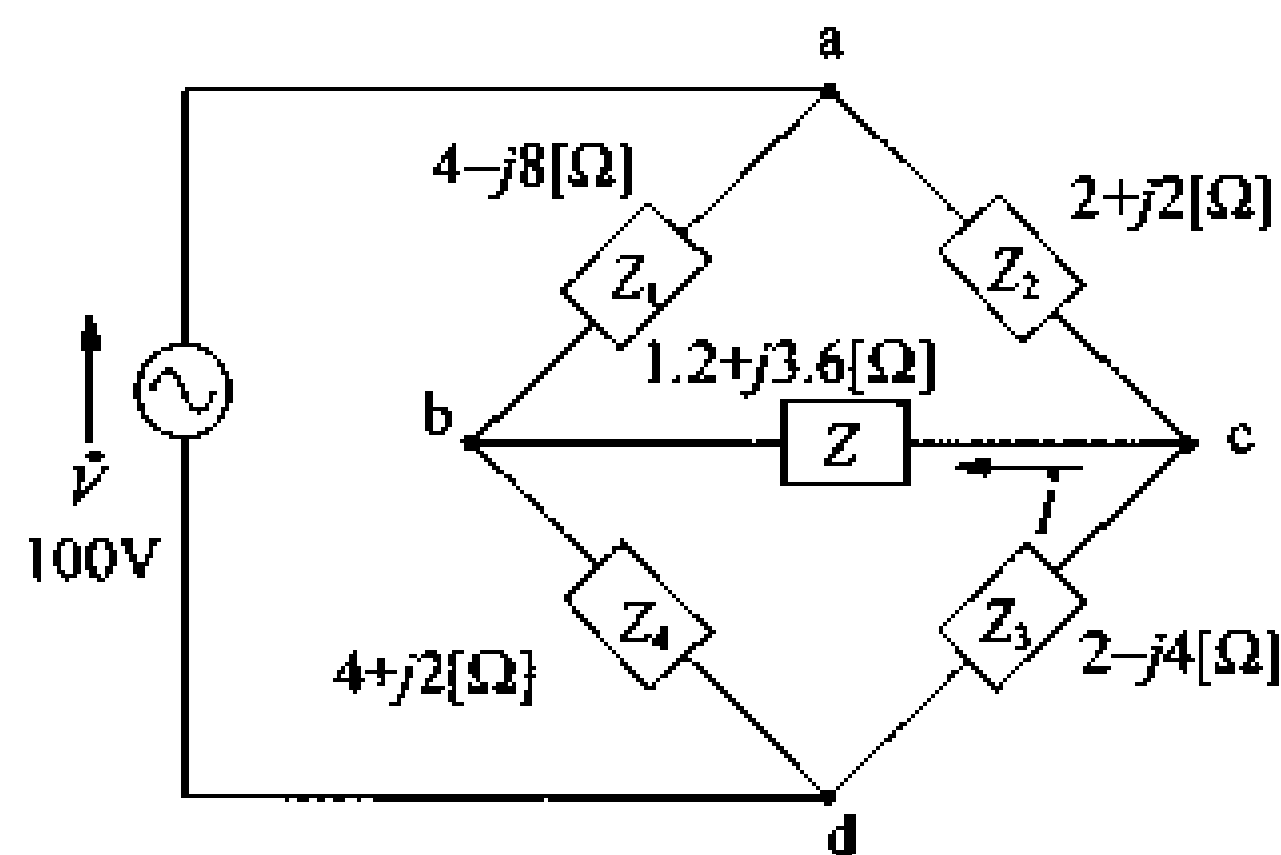


图 1.77 例 题

**答** 首先断开  $Z$ , b-c 间的开路电压  $\dot{V}_{bc}$  为

$$\begin{aligned}\dot{V}_{bc} &= \dot{V} \left( \frac{Z_4}{Z_1 + Z_4} - \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \\ &= 60 - j100 \text{ [V]}\end{aligned}$$

其次在断开的 b-c 间看到的阻抗  $Z_0$  为

$$\begin{aligned}Z_0 &= \frac{Z_1 Z_4}{Z_1 + Z_4} + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \\ &= 6.8 + j0.4 \text{ [}\Omega\text{]}\end{aligned}$$

所以,根据戴维宁定理可得到

$$\begin{aligned}\dot{I} &= \frac{\dot{V}_{bc}}{Z_0 + Z} = \frac{60 - j100}{(6.8 + j0.4) + (1.2 + j3.6)} \\ &= 1 - j13 \text{ [A]}\end{aligned}$$

## 20 电路的分布参数 $R$ 、 $L$ 、 $C$

**□ 要点** 在处理远距离输电和高频信号的电路中,不能将电阻  $R$ 、电感  $L$  和电容  $C$  等元件作为集中参数,而必须将其看作分布在整条线路上的参数来处理。

**□ 解释** ● 电路元件值的大小与波长

在远距离输电线路中,导线的电阻与整条线路有关,并且导线之间的互感、导线与大地之间的电容都是不可忽视的,所以,电路中的电阻、电感、电容等参数不能仅作为集中参数的电路元件,而必须视为分布在整条线路上的分布参数来处理(图 1.78)。这种电路称为分布参数电路。

分布参数电路

另外,在高频通讯线路中,尽管传输路径很短,但当信号频率非常高时,与波长相比电路元件的大小也就不可忽视了。在这种情况下,各个参数也必须作为电路的分布参数来处理。在通讯线路类电路中,电感和电容将成为决定电路特性的决定性因素。包含这些参数总体性质的参数称为特征阻抗  $Z_0$ ,设电阻分量可略,则特征阻抗为

特征阻抗

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (1.79)$$

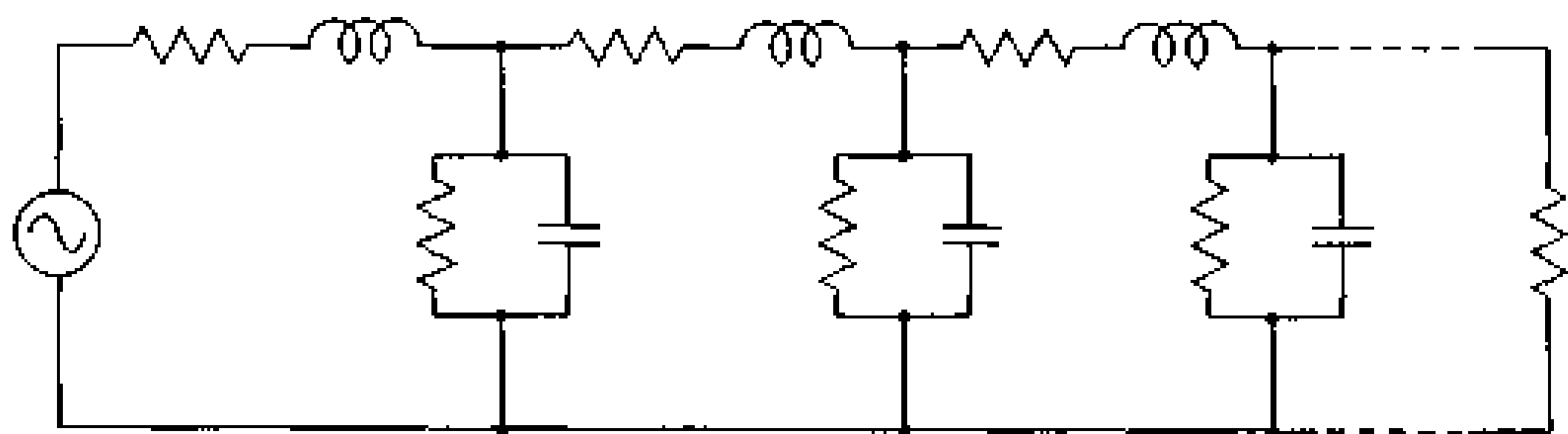


图 1.78 分布参数电路

● 等值电路

在用计算方法求分布参数电路的电气特征时,由于电气参数是作为整个电路的分布参数处理的,所以它必须是位置的函数。在可视为均匀分布的情况下,可以用图 1.79 的简单电路来处理。

等效电路

用与实际电路具有相同作用的电路来置换,这种电路称为等效电路。例如,图 1.79 是图 1.78 的等效电路。

另外,如果电源的阻抗与负载端的阻抗不同时,从 1.2 节可

阻抗匹配

知,这将不能获得最大的功率输出。在通讯线路中也一样,由于这时会出现信号的反射和衰减,所以必须加上适当的特征阻抗,使两边的阻抗一致,称为阻抗匹配。

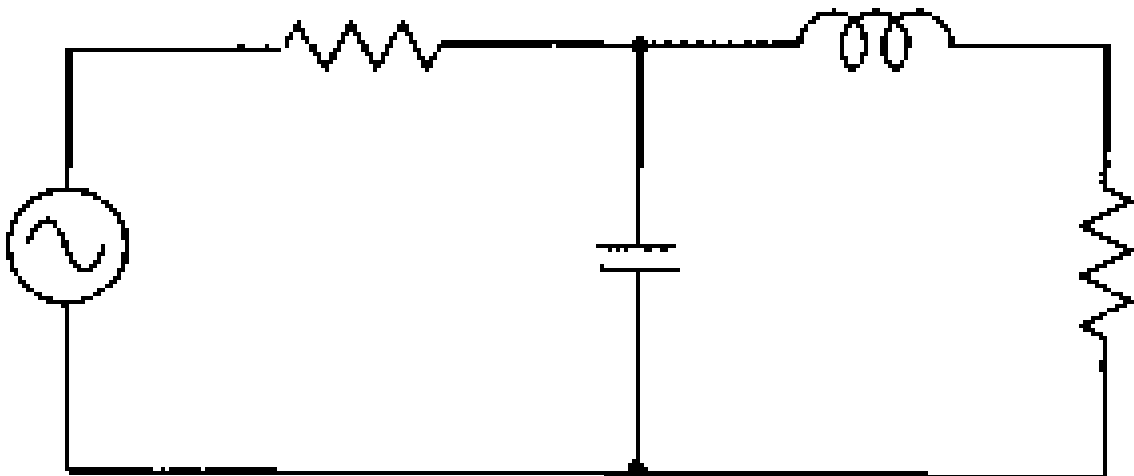


图 1.79 等效电路

应用知识 电视馈线

电视载波的高频信号在线路中传输时损失很大。天线与接收机相连的馈线必须是与信号波长相适应的低损耗馈线。

电视馈线可以用图 1.80(a)所示的对称电缆和图 1.80(b)所示的同轴电缆。特别是同轴电缆,它是用内外导体所围成的空间传输电磁波,因而损耗少,频带宽。

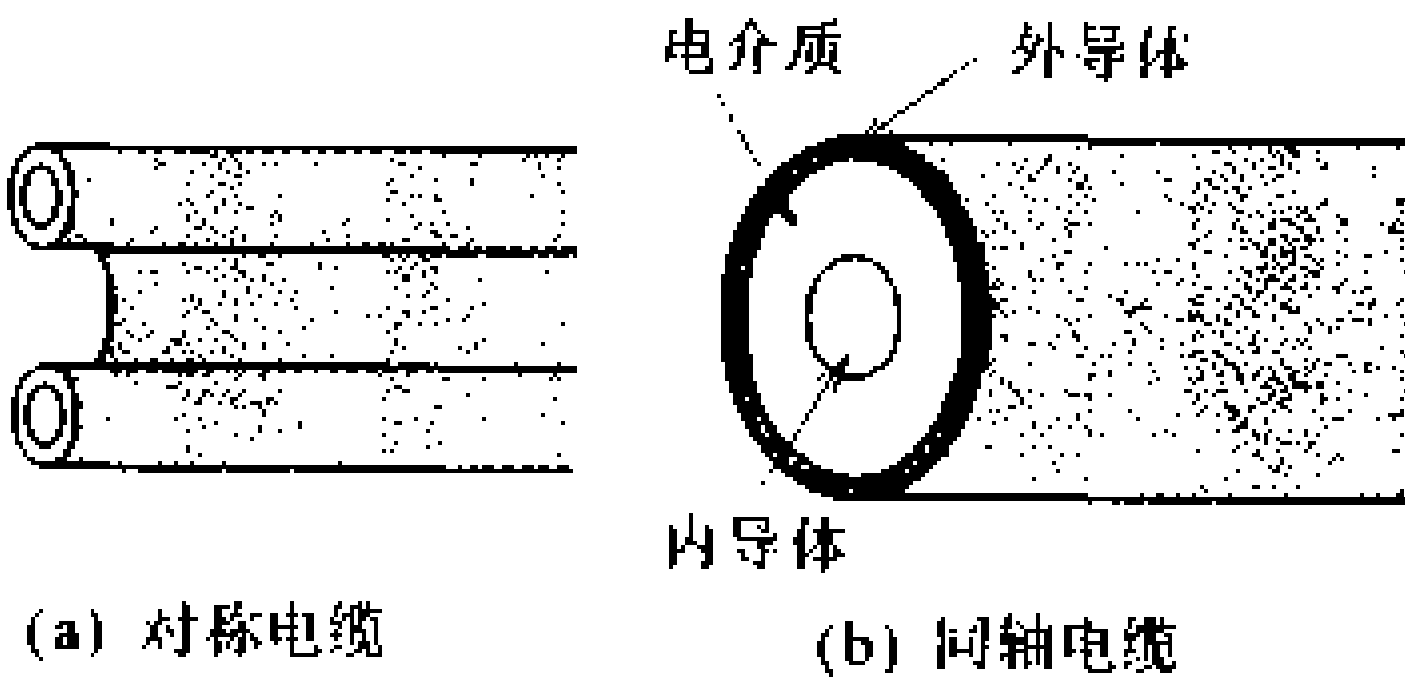


图 1.80 电视馈线

## 21 过渡现象

### □ 要点

电路从一种稳定状态过渡到另一种稳定状态所经历的过程称为过渡现象。利用过渡现象可以产生脉冲波或产生振荡。由于过渡现象是随时间变化的,所以用微分方程进行求解。

### □ 解释 ● 过渡过程和稳态

图 1.81(a)的电路中,如将开关 S 接到 a,则电源对电容器 C 进行充电。然后将开关 S 接到 b,电容器 C 就放电。电容器 C 端电压  $V_C$  的变化曲线如图 1.81(b)所示。

图 1.81(b)中,②~③为充电,④~⑤为放电。这种变化过程称为过渡现象。而①~②和③~④之间没有变化的状态称为稳态。

过渡现象  
稳态

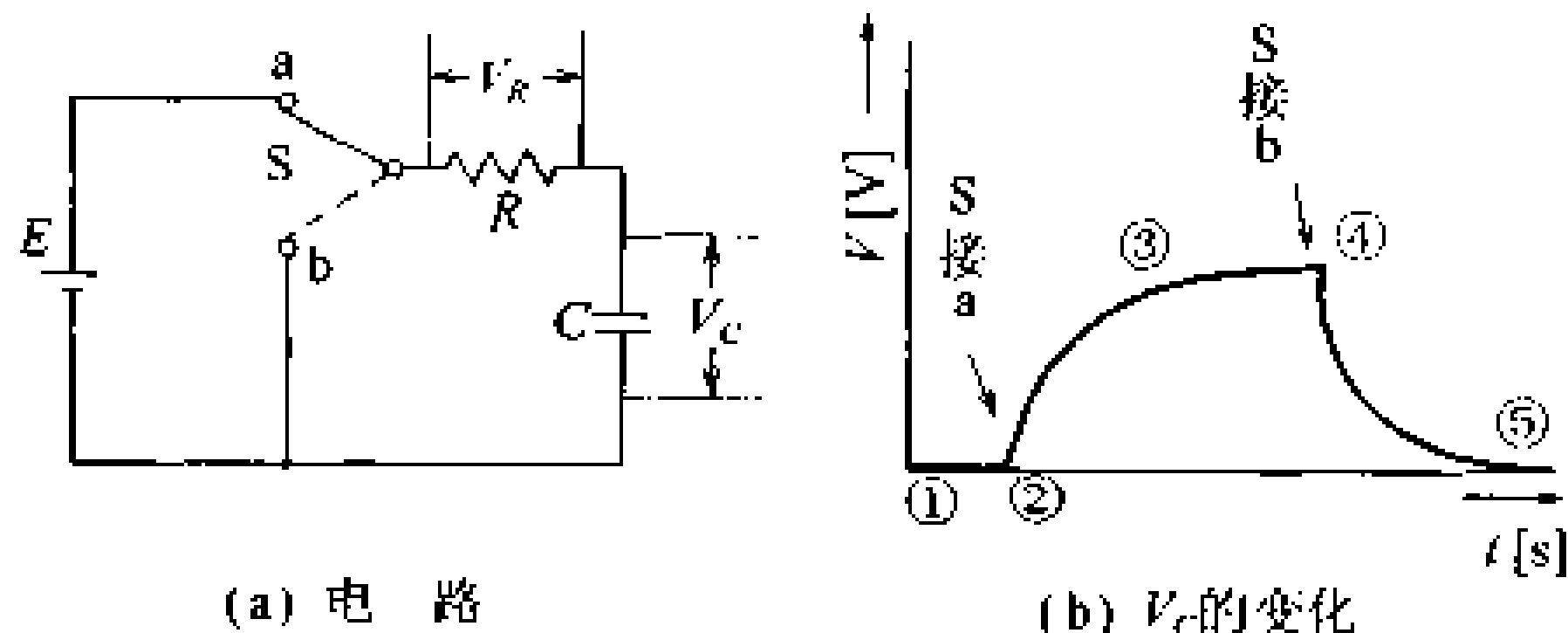


图 1.81 RC 串联电路

### ● RC 串联电路

在图 1.81(a)所示的 RC 串联电路中,用开关 S 控制电容器 C 的充放电, $C$  的端电压  $V_C$  和  $R$  的端电压  $V_R$  变化曲线如图 1.82 所示。

在这种情况下,如果固定  $C$ ,改变  $R$  值,当  $R$  值大增时, $C$  的端电压变化速度减慢;而  $R$  减小,则变化速度快。另外,假如  $R$  值固定,改变  $C$  值的大小,则  $C$  值大时, $C$  的端电压变化慢。 $C$  值小则变化速度加快。

也就是说,电容器  $C$  充放电电压变化的速度决定于  $C$  和  $R$  值的大小,其关系可表示为

$$T = RC \text{ [s]} \quad (1.80)$$

时间常数

(1.80) 式中的  $T$  称为时间常数,它表示过渡现象的变化速度。

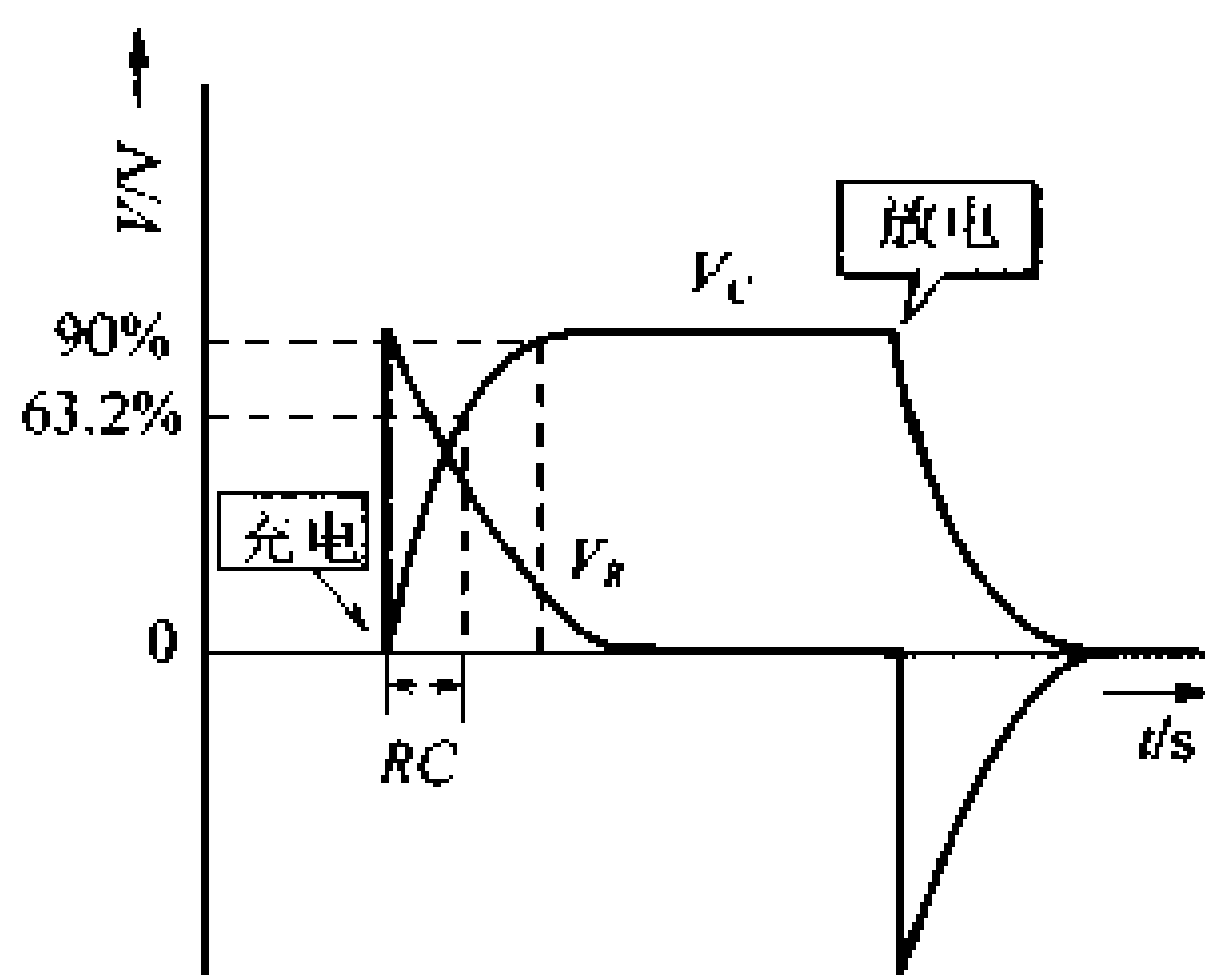


图 1.82 RC 串联电路元件端电压

时间常数  $T$  为到达稳定状态所需时间的 63.2%。

### ● RL 串联电路

在图 1.83(a) 所示的  $RL$  串联电路中, 开、合开关  $S$  时,  $L$  的端电压  $V_L$  以及  $R$  的端电压  $V_R$  的变化示于图 1.83(b)。 $RL$  串联电路的时间常数可表示为

$$T = \frac{L}{R} [\text{S}] \quad (1.81)$$

### ● 用微分方程表示 $RL$ 串联电路

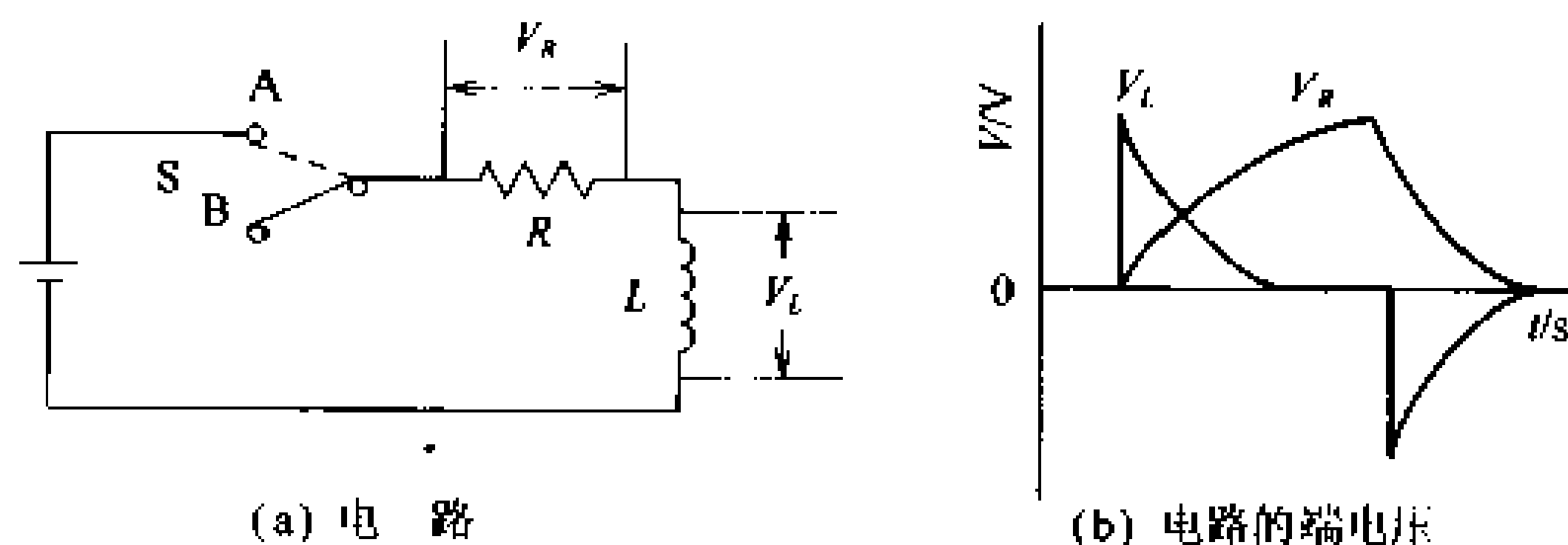
在过渡现象中, 电路的输入信号是电源的断开与闭合造成的, 它不具有正弦波的规律。因而描述产生过渡现象的电路需要采用以时间为独立变量的微分方程。

例如, 在图 1.83(a) 所示的  $RL$  串联电路中

$$V_R + V_L = V \quad (1.82)$$

将  $S$  接至  $A$  点时, 电流  $i(t)$  的微分方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = V \quad (1.83)$$

图 1.83  $RL$  串联电路



由于  $t < 0$  时  $I = 0$ , 所以  $i(t)$  为

$$i(t) = \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (1.84)$$

## 应用知识

在图 1.84(a) 的  $RC$  串联电路中, 当输入脉冲宽度为  $\tau[s]$ 、周期为  $T[s]$  的方波时,  $V_R$ 、 $V_C$  的波形示于图 1.84(b)。

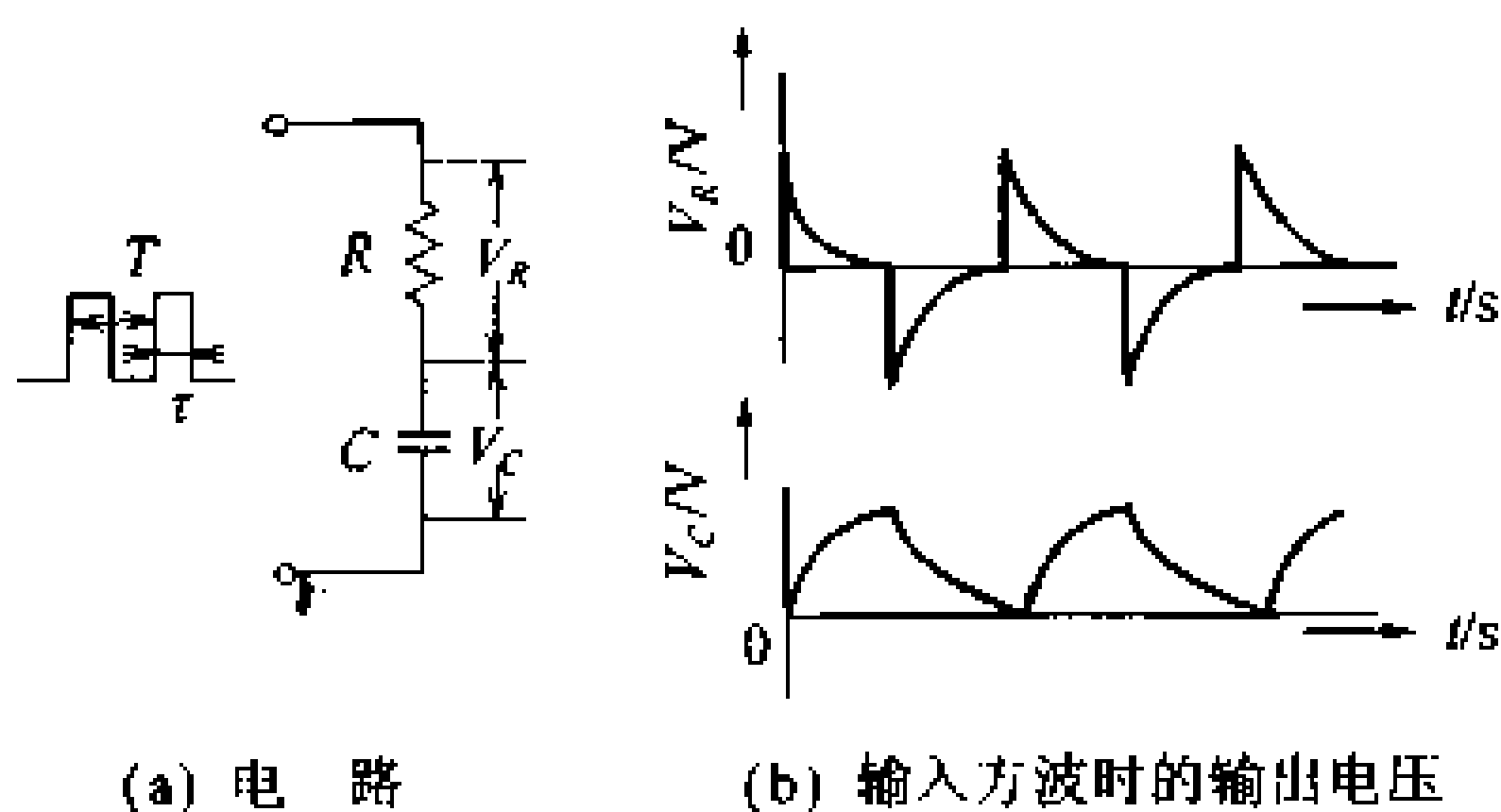


图 1.84  $RC$  串联电路

在这个电路中, 当时间常数  $RC$  远小于脉冲宽度  $\tau$  时, 则  $V_R$  表示输入脉冲的变化率, 如图 1.85(a) 所示。而当  $RC$  远大于  $\tau$  时,  $V_C$  即表示输入脉冲变量的积分值, 如图 1.85(b) 所示。前者称为微分电路, 后者称为积分电路, 详细内容将在第 4 章说明。

这样就可以利用过渡现象进行脉冲波形的变换, 或从脉冲波形中取得所需要的信息。

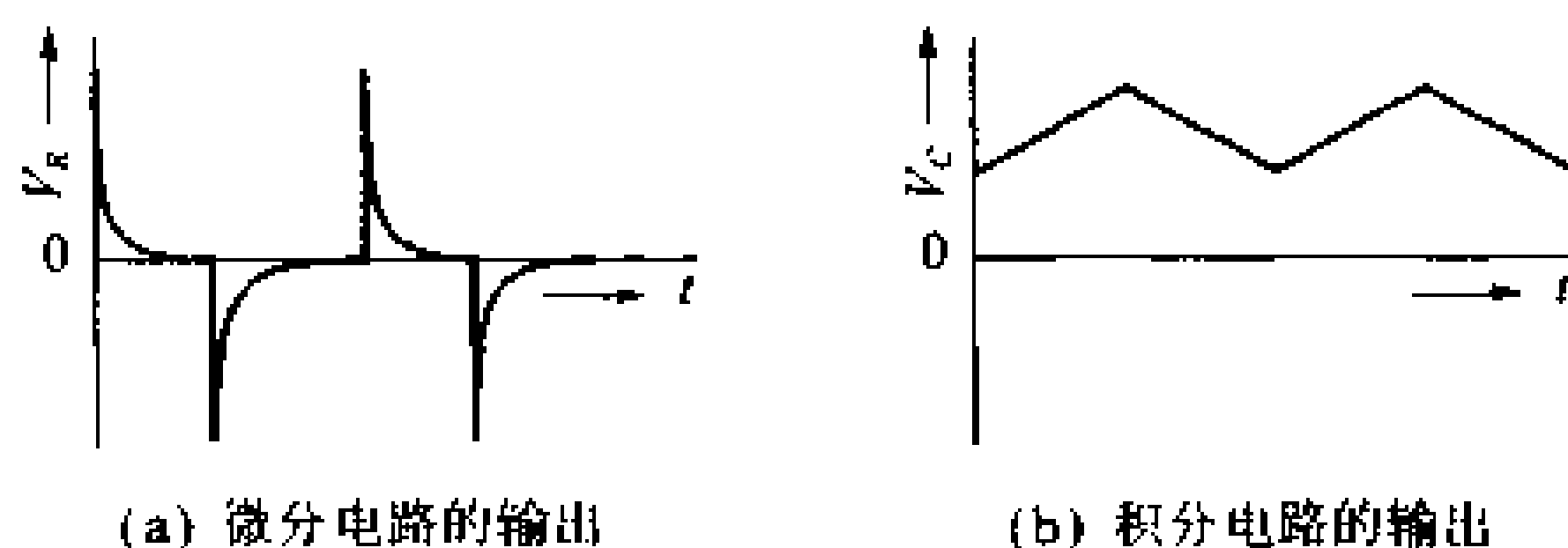


图 1.85 应用举例

### 地磁与生物磁

不仅是永久磁铁或电流可以产生磁场,人类生存的地球也是一个大磁体。地球表面的磁场称为地磁。用指南针可以知道,地球的北极是磁场的S极,南极是N极;还可以知道,磁极与地球地理极点稍有偏离。另外,受太阳活动的影响,地磁是变化的。如果变化很大,就形成“磁暴”现象,它会影响利用电离层的通讯工作。

人类在日常生活中对地磁没有感觉,假如人体也是一个磁性体,那将会怎么样?如果人本来具有面向北方的性质,那么为了转向南方,就必须付出劳动力以克服磁场的作用。不过,自然界确实存在着体内具有磁性的生物。例如,有一种称为趋磁菌的细菌,体内具有带磁性的超微粒子,这细菌可用它来感知地磁,因而它能转向泥多的地下。

现已查明,有多种生物,它们是体内具有这种磁性微粒的生物磁体。鲑鱼能返回它们的出生河流,蜜蜂能准确地返回蜂巢,不正是因为它们体内的磁体能感知地磁吗?

很遗憾,人的体内不能产生这种磁性体。假如可以人工制造的话,那将有很大的前途。例如,将磁体与人的微观组织相结合,那么也许就可以很容易地利用磁性从人体外控制体内的重要组织。

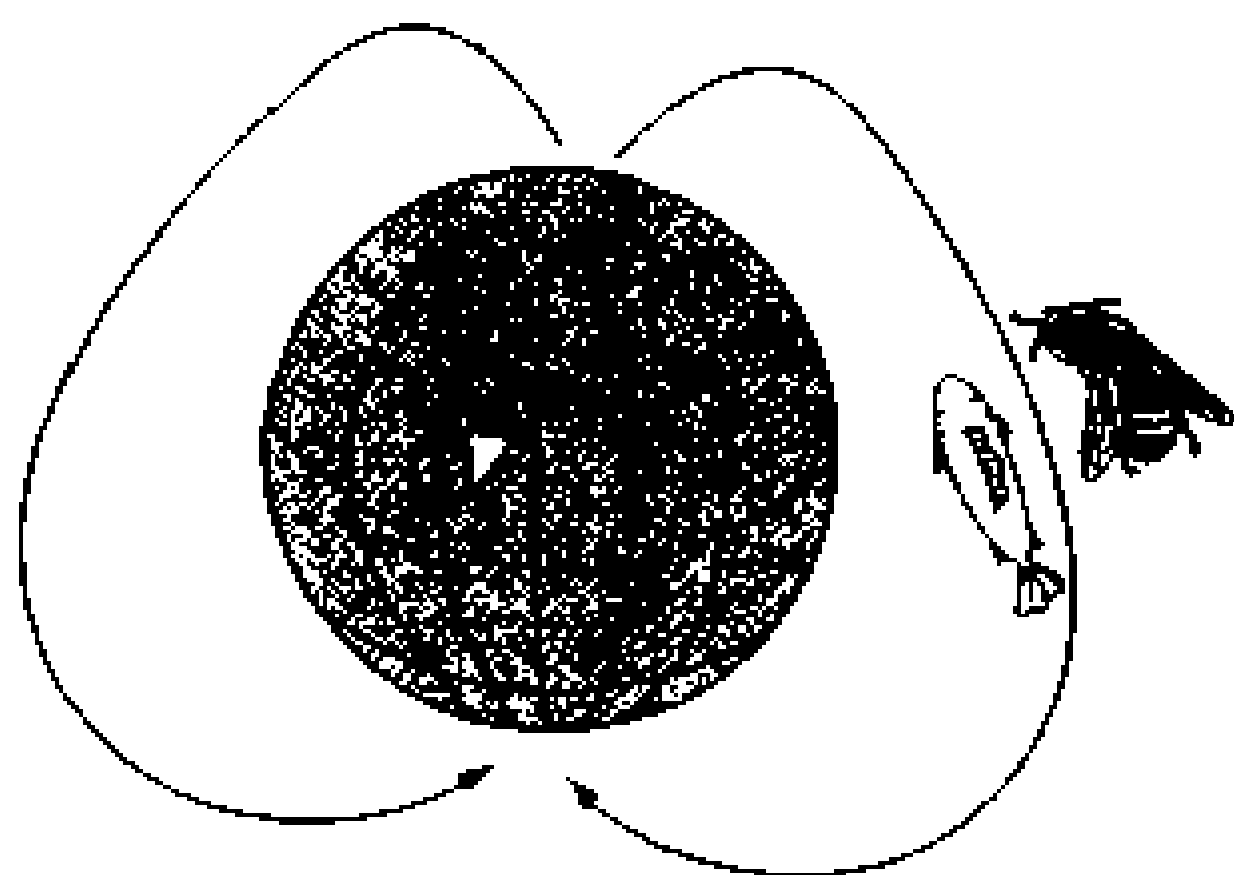
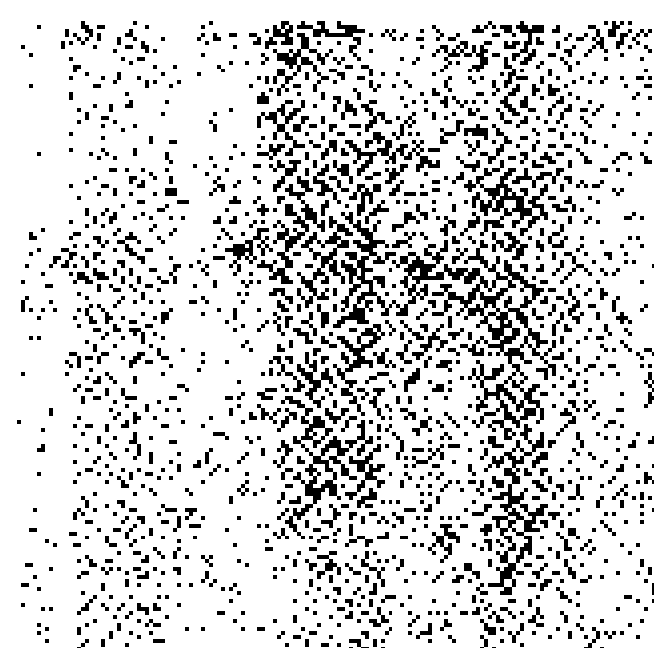


图 地磁与生物磁



## 第2章

# 电子物性和 电子器件



- 责任编辑  
山本义男
- 执 笔  
山本义男

物质所具有的电气性质称为电子物性。物质是怎样成为导体和绝缘体的?物质当中也有既不是导体又不是绝缘体,而是处在它们中间的半导体。

半导体,不仅它的电阻处在导体和绝缘体之间,而且它在电气方面也具有独特的性质。物质具有不同的电气性质是因为物质中的电子的运动不同所致。为了了解二极管和晶体管等元器件的作用,在了解物质结构的同时,还必需先看看物质中电子的运动状态。

本章在学习半导体元件的物理基础的同时,也希望了解它的结构和功能以及工作原理。

# 1 原子与电子

## □ 要 点

构成物质的原子,它是由原子核和电子组成。如果是孤立的原子,它的电子只能在限定的电子轨道上稳定的运动。轨道最外层的电子给出了原子的化学键。

## □ 解 释 ● 关于原子模型

地球和火星等行星是围绕着太阳作轨道运动。原子核和电子的关系也和太阳与行星的关系相似。但是,因为原子核和电子是带电的,所以如果电子和行星作同样的运动,那么就会失去能量而完全毁掉。如果荷电粒子作圆周那样的加速运动时,它就以电磁波的形式放出能量。电子绕核运动时以电磁波形式放出能量和天线流过高频电流时发射电波的原理相同。但是在研究电子物性时,因为在这些方面没有很大差异,所以常采用模型来进行研究。这种简单的原子模型被称为长冈-卢瑟福原子模型(图 2.1)。

长冈-卢瑟福  
原子模型

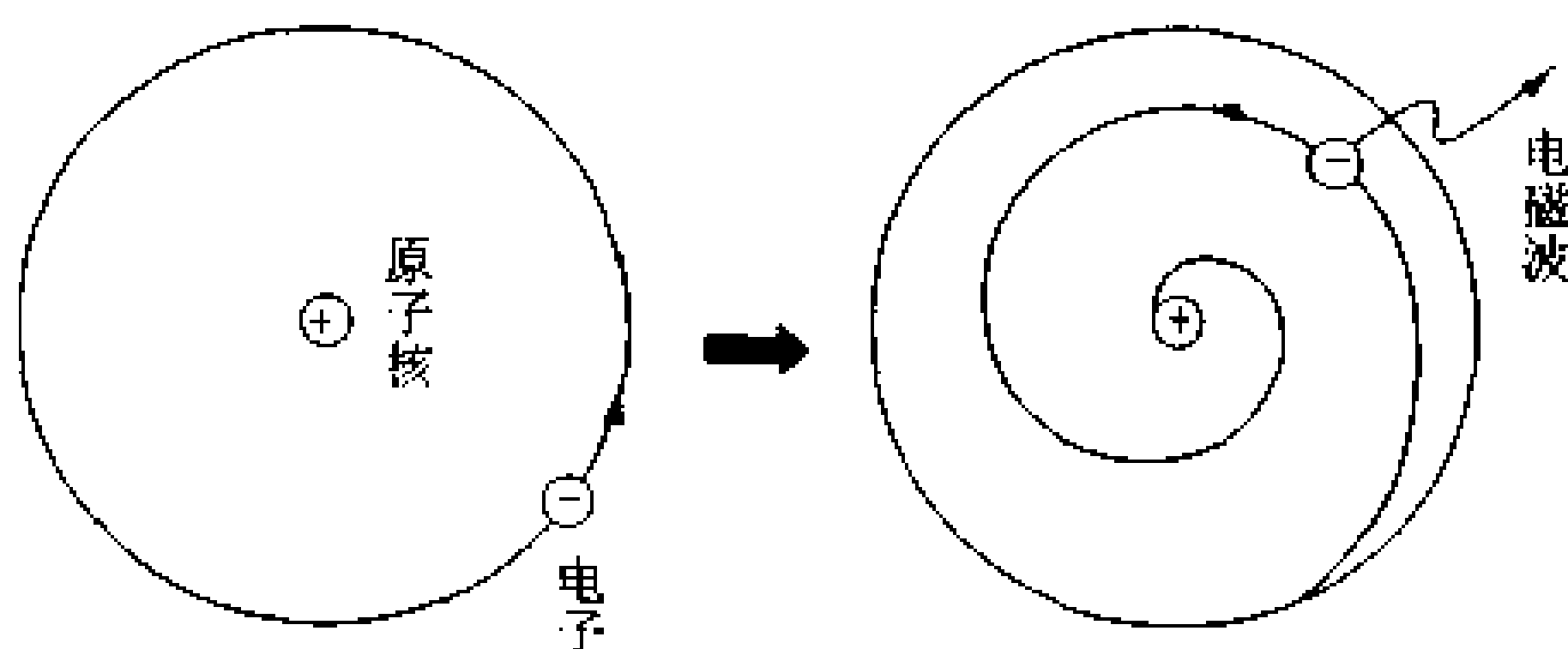


图 2.1 长冈-卢瑟福原子模型

本来,电子具有波动性,而且电子在原子中是处在一种共振状态。在肉眼看不到的极小的原子世界里,粒子具有波动性质,而波动性又具有粒子的性质。

## ● 氢原子的能级

如果电子具有波动的性质,那么氢原子为何能稳定存在呢?如果是波,那它的波长又是怎样的?根据德布洛意原理,如果电子的质量为  $m$ ,速度为  $v$ ,那么它的波长  $\lambda$ :

$$\lambda = h/mv \quad (h: \text{普朗克常数}) \quad (2.1)$$

德布罗意波

物质波 电子波

把这个波称为德布罗意波。德布洛意波对于所有物质都成立,且称其为物质波。在电子的情况下称电子波。电子波在原子中处在一种共振状态。(图 2.2)

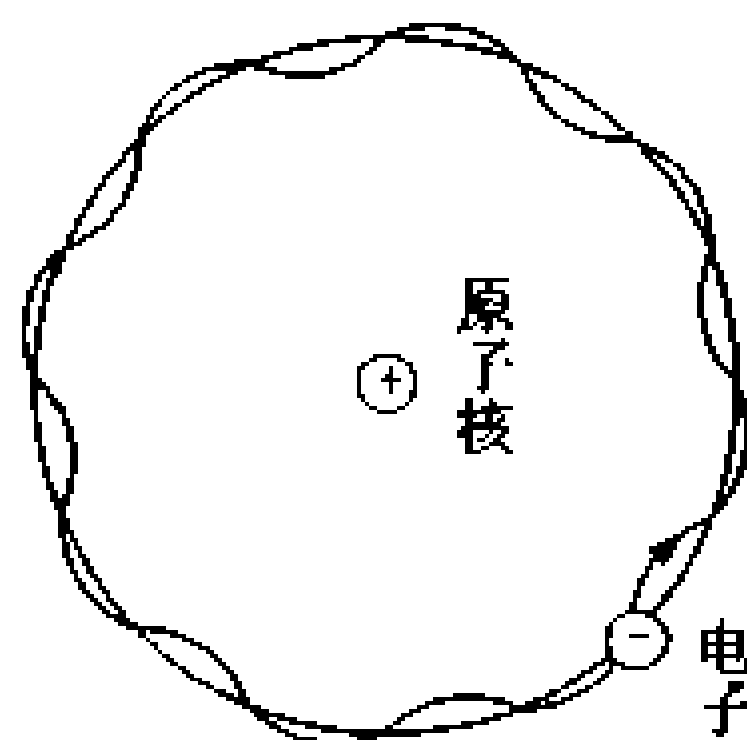


图 2.2 玻尔原子模型

以孤立的氢原子为例来研究一下电子的运动。在共振状态(正常状态)下,电子轨道的长度,正好等于电子波波长的整数倍,故有

$$2\pi r = n\lambda \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2.2)$$

玻尔量子条件

把这个称为玻尔量子条件。另外,为了使电子能以粒子形式作圆周运动,这时,因为库仑力和离心力正好相平衡,故可得

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (2.3)$$

由(2.1)、(2.2)、(2.3)式可求得:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2 \\ &= 0.53n^2 (\text{\AA}) \quad (\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

玻尔半径

因为  $n$  是整数,所以从上式可知:电子轨道是分散的(不是一个值),而且电子还不能随意占有一个轨道。特殊情况是  $n=1$ ,称这时的  $r$  为玻尔半径,且以这时的原子大小为基准。

因为电子具有的总能量  $E$  是它的动能和位能之和,故有

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} mv^2 + \left( -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \\ &= -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

能级

因为  $n$  是整数,所以电子具有的能量  $E$  也成为分散值。把与整数  $n$  相对应的  $E$  称为能级。图 2.3 中给出了电子轨道和能量关系的模式图。

### ● 硅原子的电子配置

硅

硅是最常用的半导体。而且它大量存在于构成地壳的岩石中。它和孤立的氢原子情况一样,孤立的硅原子的电子轨道和电

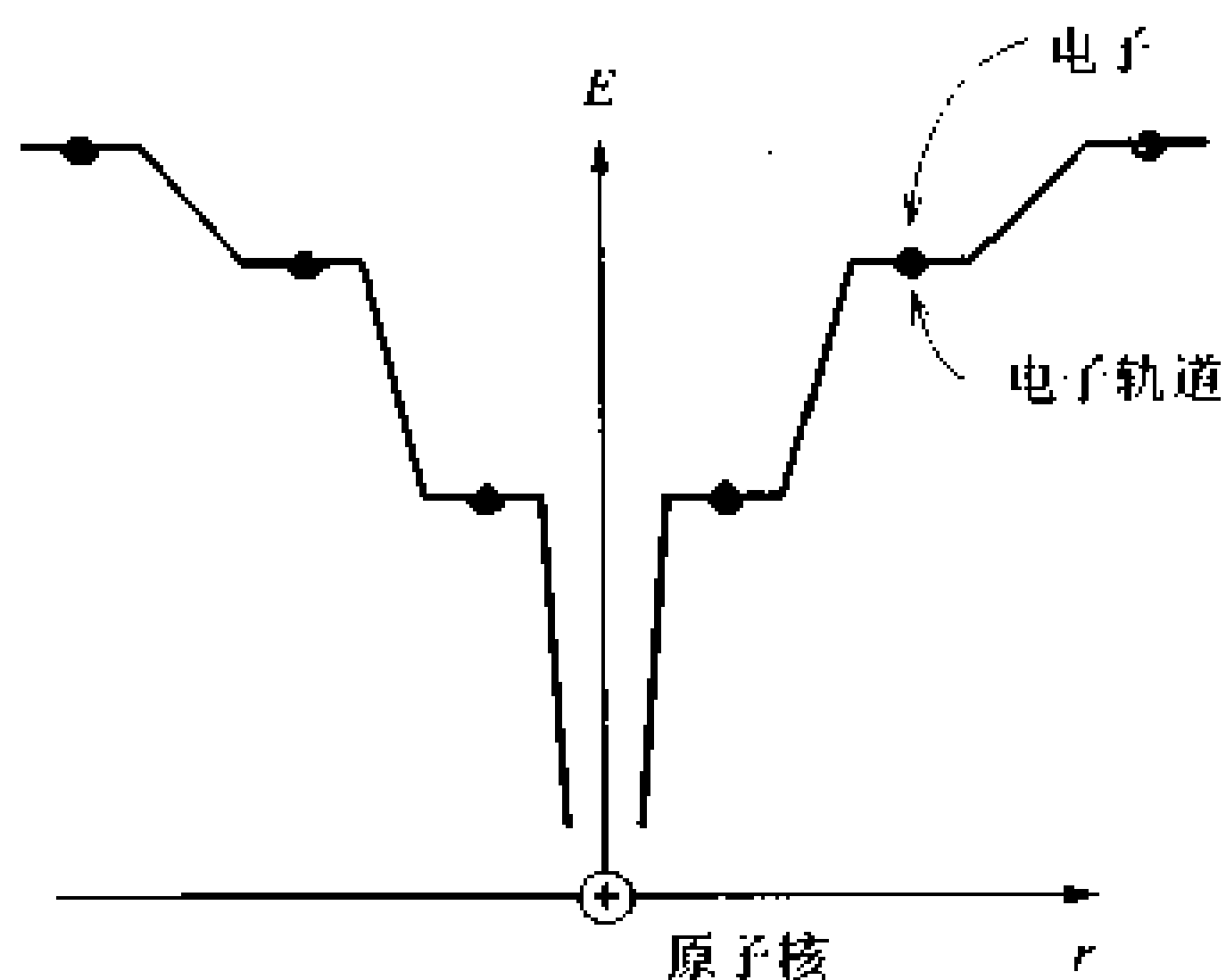


图 2.3 电子轨道的模式图

子能量是离散的,电子轨道从内层开始按顺序称为 K 层,L 层和 M 层。能处在各轨道的电子数是有上限的。K 层是 2 个,L 层是 8 个,M 层也仅能容纳到 8 个。可是,因为硅的质子数是 14 个,所以 M 层上的电子只有 4 个,没有收容满。最外面的轨道称为**最外层轨道**。最外层的电子称为价电子。价电子给出该原子的化学键(图 2.4)。

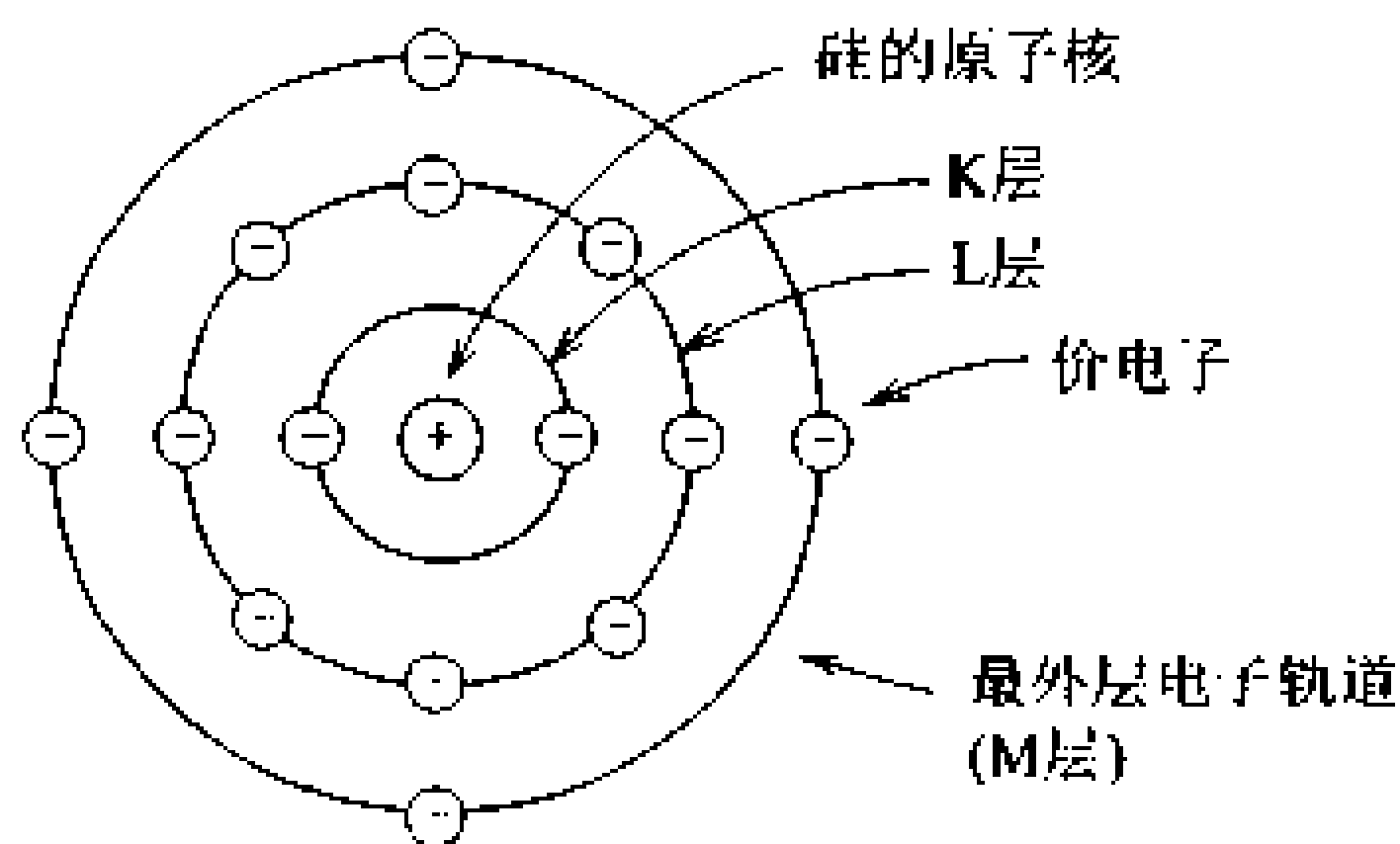


图 2.4 硅原子的电子配置

## 2 原子的排列和结晶

### □ 要 点

原子有序而规则排列的物质称为晶体。如,经常使用的半导体硅和锗,由于共价键而形成金刚石结构的晶体。如果是任意一种原子,假如它是金刚石结构,由于有4个价电子,它可和4个原子进行共价键。

### □ 解 释 ● 球的堆积

看过雪的结晶吗?它是什么样的?如果仔细地看,就会看到,它的形状很规则且很漂亮。是各种各样的,而且是规则的点对称。这种规则性来自水分子的性质。水分子的性质是由构成水分子的原子的性质而来的。把原子和分子非常规则排列起来的物质称为晶体。把排列很规则的单元称为晶格。把规则性混乱的地方称为晶格缺陷。

晶体 晶格  
晶格缺陷

作为半导体而使用的硅也可形成晶体。形成晶体的原子和分子是怎样排列的?首先假定忽视原子的性质,来看一下半径相同的硬球的排列方式。如果是无间隙很规则排列硬球的方法,那它只有一种(图2.5)。也就是说,无论是把硬球放在B处也好,或是放在C处也好,如果把球旋转 $180^\circ$ ,出现的情况都是相同的。可是把球作成三维的方式时,就有二种。即把硬球放在A处或C处,其三维结构是不同的。放在A时,称为面心立方晶格,金属原子多是这种排列方式。放在C时,是最密堆积六方晶格,是冰的水分子排列方式。

面心立方晶格  
最密堆积六方  
晶格

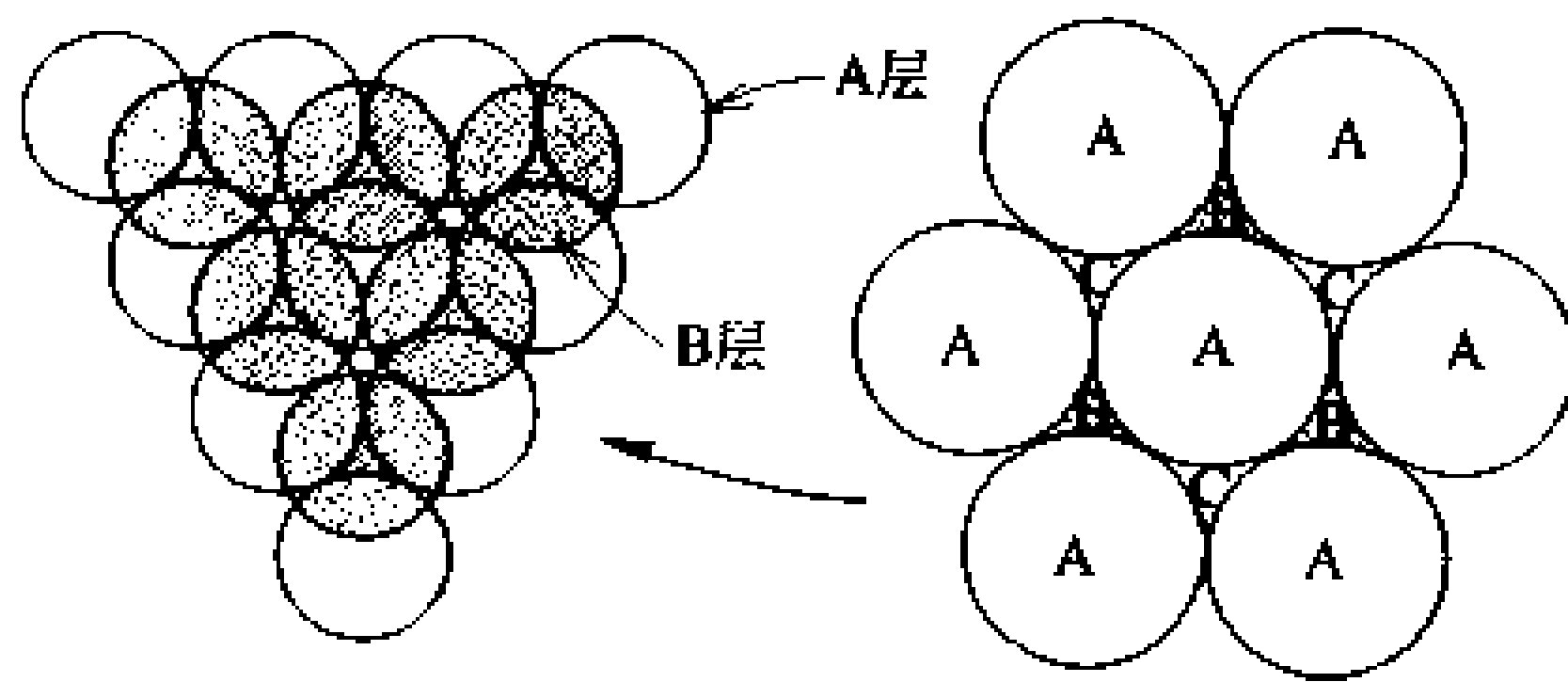


图 2.5 硬球的最密堆积

### ● 关于金刚石结构

金刚石结构

半导体硅可形成金刚石结构。金刚石结构可以按二个面心立方晶格为基础来进行考虑。面心立方晶格是和立方体的8个顶点



和 6 个面的中心处分别配制原子的结构相同。假如把这二个面心立方晶格分别在  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴方向每隔  $1/4$  错开重复排列起来,那就成为金刚石结构。于是不管哪一个原子都分别和相邻的其它 4 个原子形成共价键的结构。再用一个面心立方晶格的硅原子(图中黑圆点)来看看它的坐标(假定每边长度为  $a$ )。坐标轴如图所示那样,则分别有(图 2.6)

$$\begin{aligned} (0.25a, 0.25a, 0.25a), & \quad (0.75a, 0.75a, 0.25a), \\ (0.75a, 0.25a, 0.75a), & \quad (0.25a, 0.75a, 0.75a). \end{aligned}$$

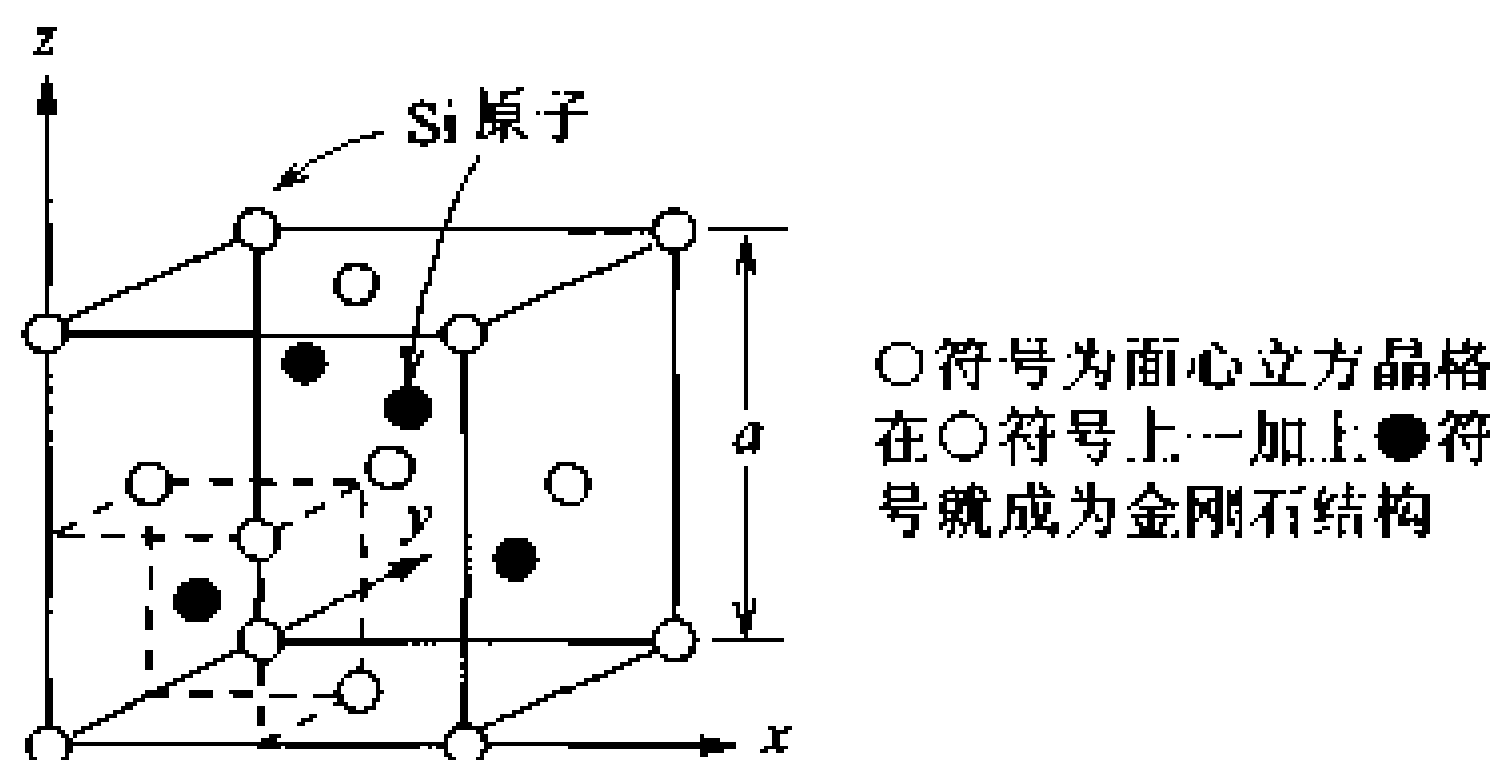


图 2.6 金刚石结构

### ● 关于硅结晶的平面模型图

如果将立体的结晶表示在平面上,其结构很难看懂、在半导体方面不只是结晶的问题,就是像形成金刚石结构的 4 个价电子的作用也是非常重要的(图 2.7)。因此,常常使用价电子的平面模型图来说明问题。它是用围起价电子的二条线来描绘共价键状态的(图 2.8)。

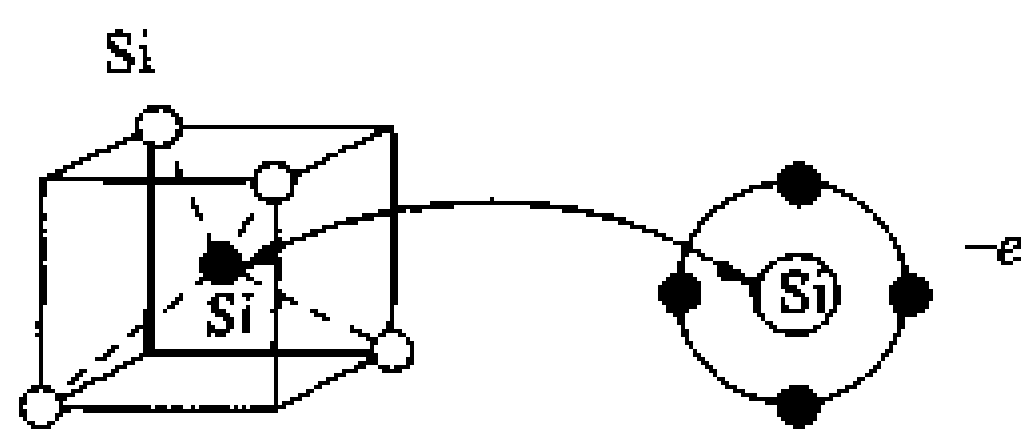


图 2.7 硅的价电子

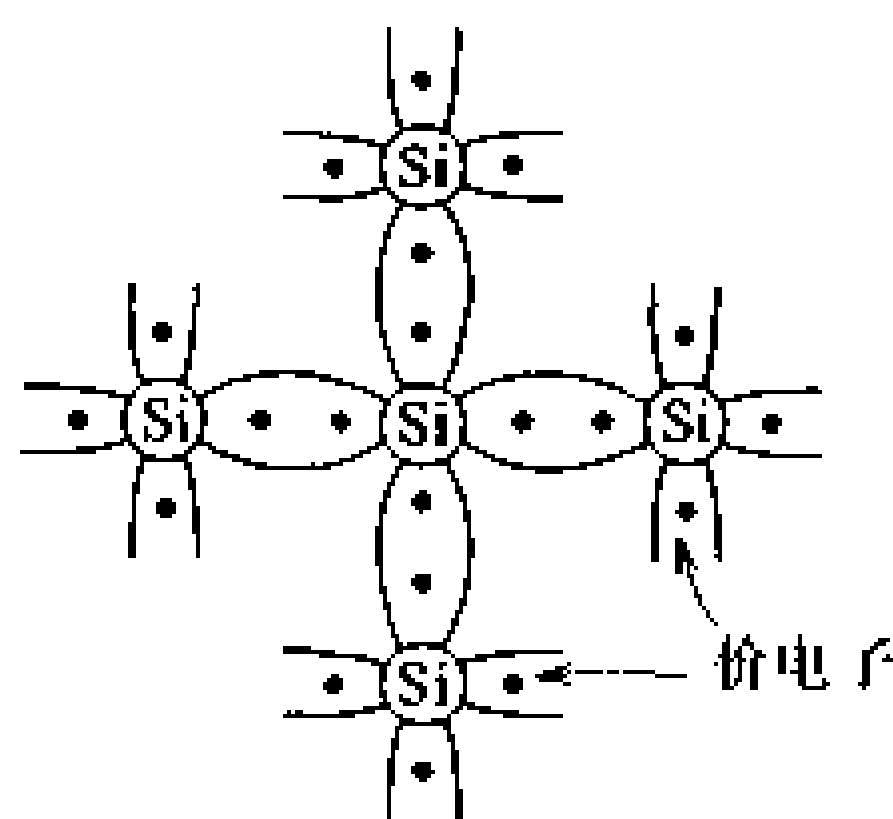


图 2.8 金刚石结构的平面模型图

# 3 能级和能带

## 要 点

假如是孤立的原子,它的电子轨道是分开的。如果成为晶体,电子轨道就形成一个宽带。密集的电子轨道就形成了分开的允带。

## 解 释

### ● 电子轨道分裂的背景(原因)

原子中的电子具有确定的轨道和确定的能量。那么,二个相同元素的原子相接近时将是怎样的? 二个原子形成的势能(potential)是二个单独原子时的势能相互重迭。这时它与单独原子相比,其势能降低了。如图 2.9 所示,相同电子轨道的能级发生了相互重迭。可是,实际上一个能级上只能容纳不超过 2 个电子。这一现象称为泡利(pauli)不相容原理。因此,轨道分裂成二条(图 2.10 所示)。如果有三个电子集聚,其重迭的能级轨道就分裂成三条。

泡利不相容原理

能带

单独原子时,电子得到的能量是离散值。如果是晶体,因为原子有无数个,所以,分散值就汇集成带状的能带。

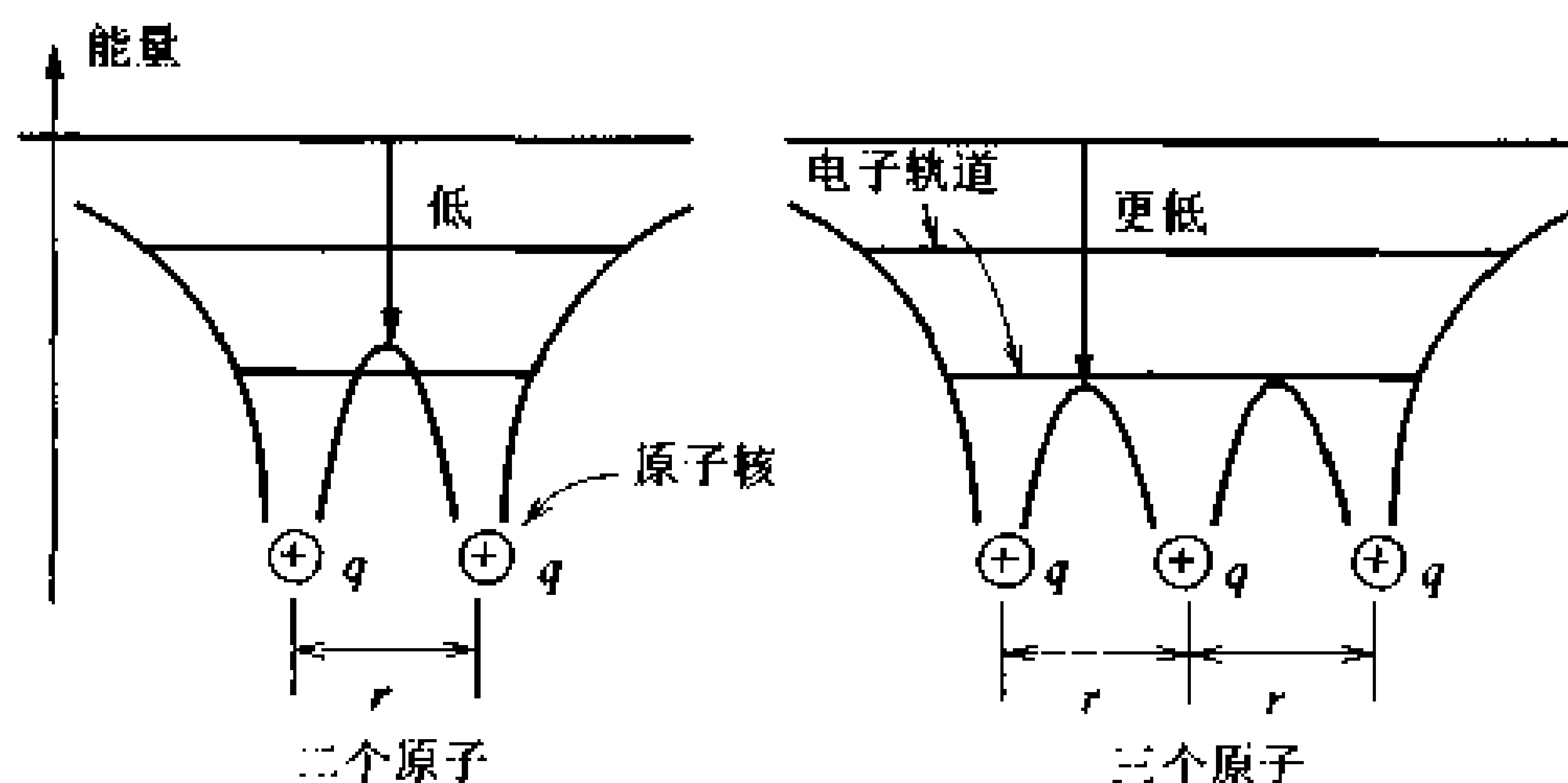


图 2.9 势能的变化

### ● 关于能带图

由于轨道分裂而形成的能带被叫作允带。允带能够容纳电子。不是允带的地方叫作禁带。禁带的宽度称为带隙(band'gap)。另外,把禁带和允带的应有状态称为能带结构。数个孤立原子集合起来时,电子轨道分裂并形成能带。它的这种状态,当取  $x$  轴为原子间距, $y$  轴为能量时,可用图 2.11 进行描绘。

允带

禁带 带隙

能带结构

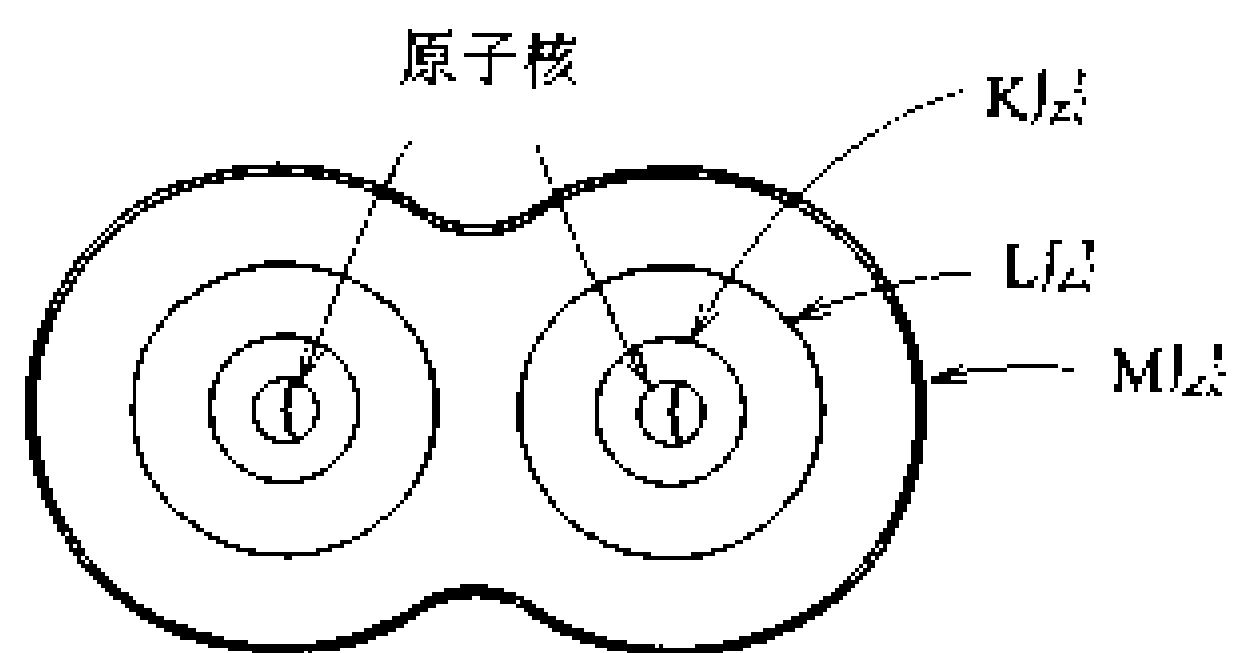


图 2.10 二个相接近原子的共同轨道

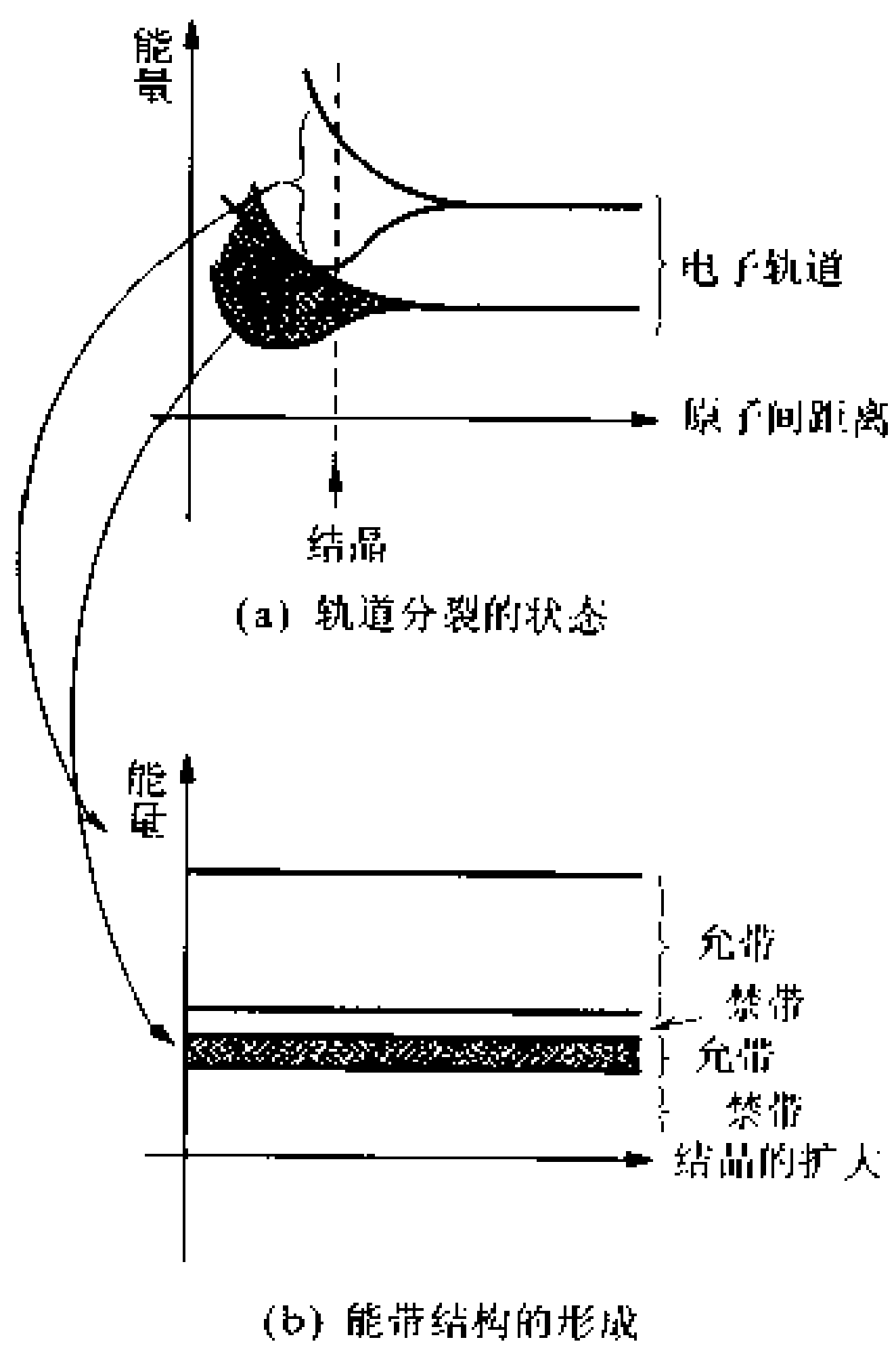


图 2.11 能带图

# 4 晶体中的电子运动

□ 要 点

一种物质是金属、绝缘体、半导体，可用能带的状态来决定。电子占据某一能级的几率可用费米·狄拉克分布函数给出。

□ 解 释

● 金属、绝缘体和半导体的区分

价电子带  
导带

将由最外层轨道分裂而形成的允带称为价电子带。价电子带上的允带称作导带。当价电子带的所有轨道上不能都填满二个电子时，这种物质就是导体。价电子带的所有轨道上都被二个电子填满时，这种物质就是绝缘体。这和满员电车里人不能移动是相似的。

自由电子  
空穴 缺陷

半导体硅里，价电子带的所有轨道都被电子填满，可是它的带隙宽度与绝缘体相比因为很窄(约 1eV)，所以一有热激励，就能使某一电子从价电子带跃迁到导带上。跃迁到导带上的电子，因为能够在允带中自由移动，所以称此种电子为自由电子。另一方面，价电子带中的电子跳出之后就形成空穴或缺陷。空穴如同正荷电粒子一样也可以在价电子带中移动(图 2.12)。

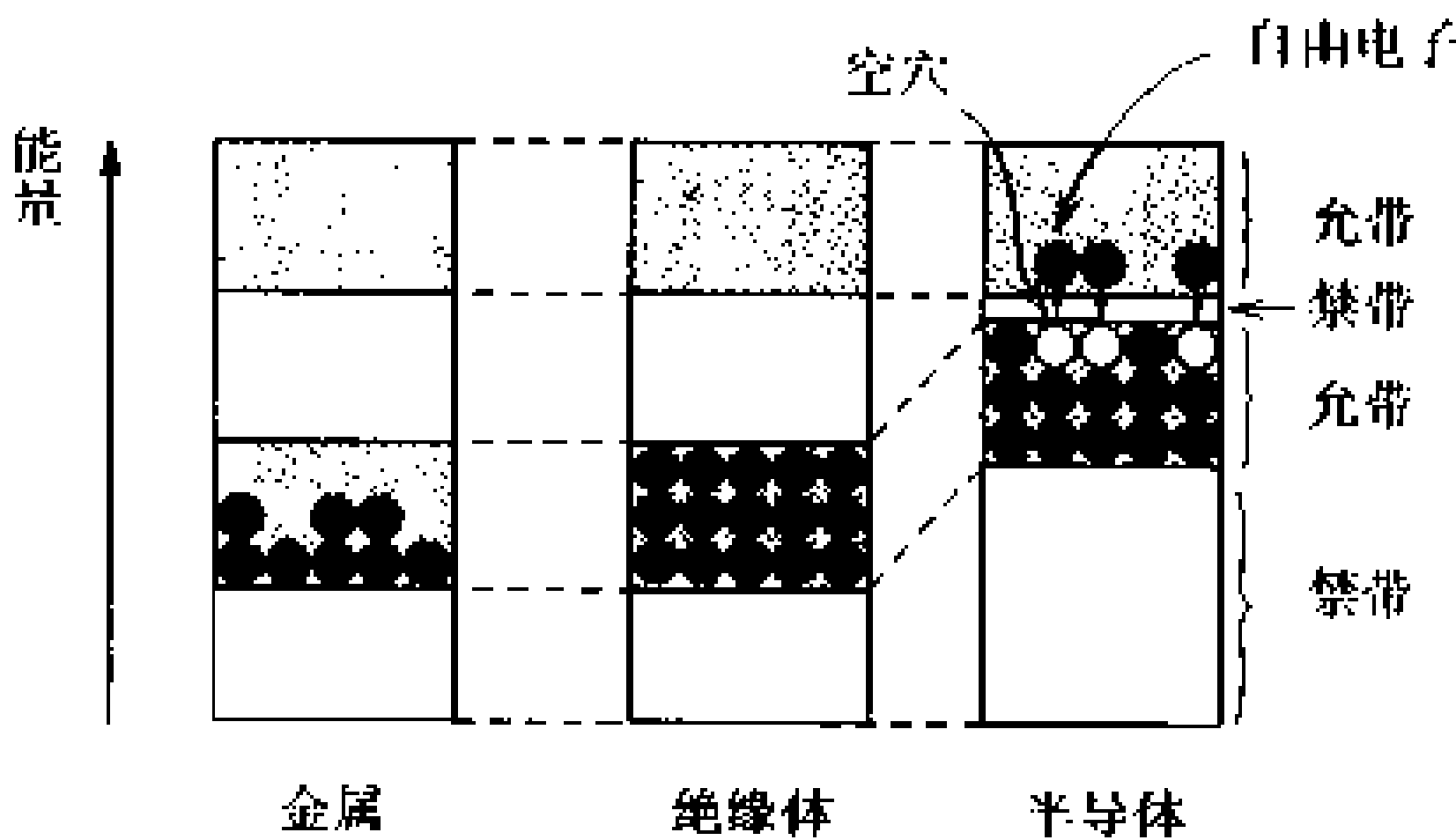


图 2.12 晶体能带

● 费米能级

费米能级  
费米能量

研究一下价电子带能级只有一半被电子填满的能带。如果温度是绝对零度，这时因为电子不受热激励，所以电子从能量低的能级按顺序，每一能级进入二个。每一能级进入二个电子是根据泡利不相容原理来的。这时把电子占据最高的能级称为费米能级。称这个能级的能量为费米能量(图 2.13)。

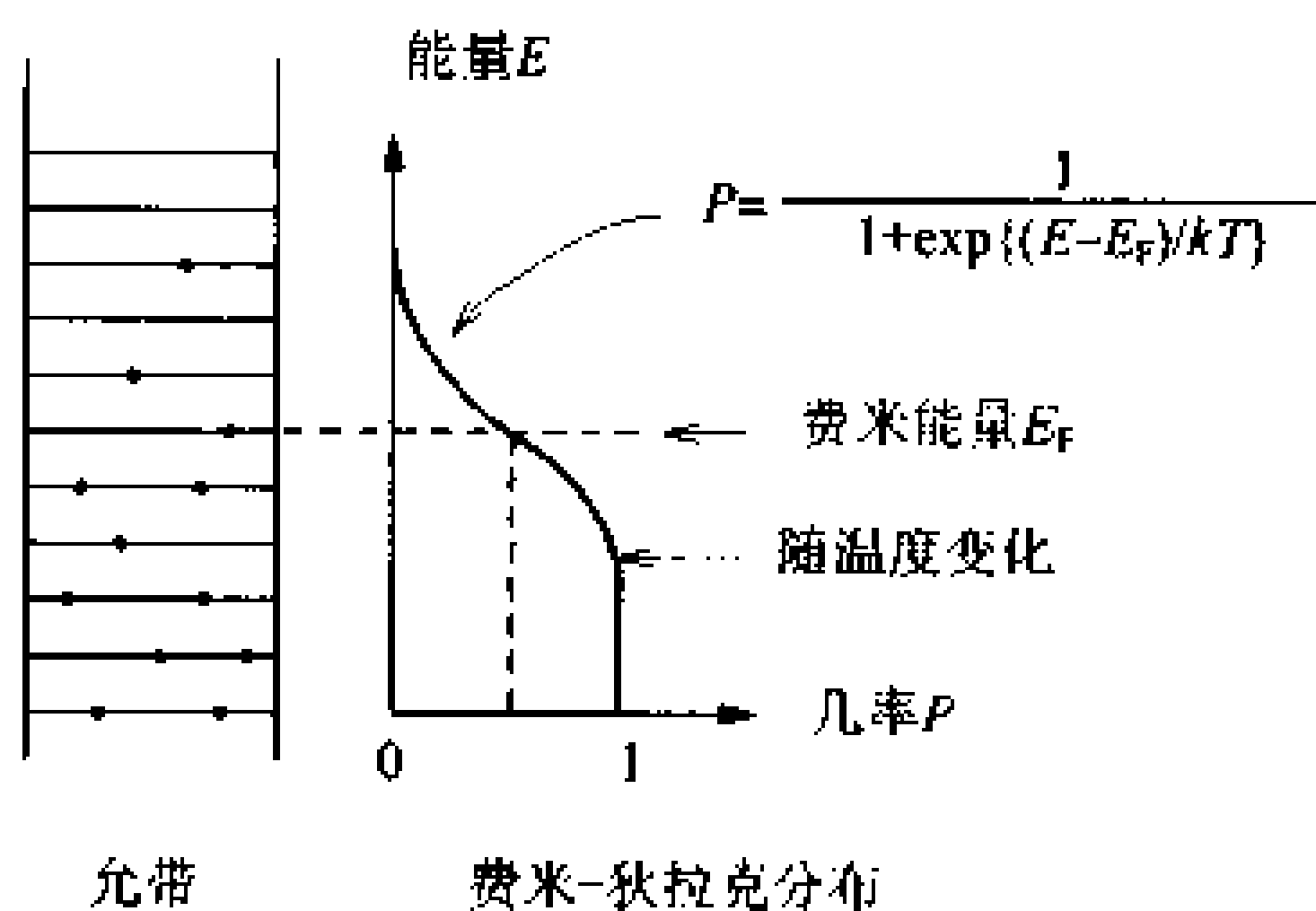


图 2.13 电子的存在几率

费米-狄拉克  
的分布函数

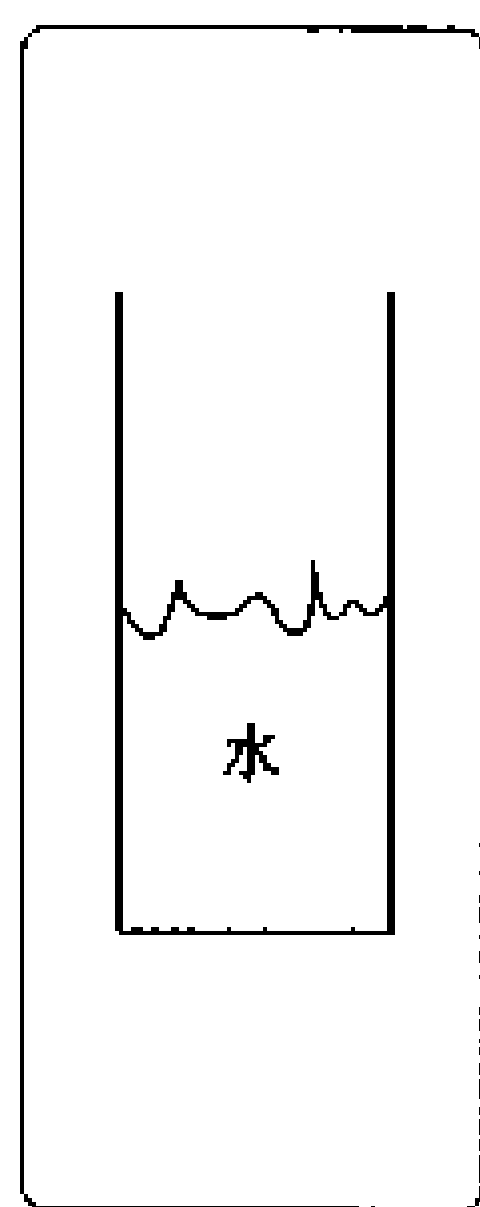


图 2.14 水的振动

如果温度高出绝对零度,这时,电子受热激励就占据比费米能级更高的能级。给出这种电子占据几率的是费米-狄拉克的分布函数  $P$ ,它如下式所示:

$$P = \frac{1}{1 + \exp\{(E - E_F) / (kT)\}}$$

上式中  $k$  为玻尔兹曼常数

如图 2.14 所示,这个分布函数与倒入容器中的水由于振动而发生起伏波动的现象相似。容器振动就相当于温度是绝对零度的状态。

## □ 相关知识 ● 关于堆积

把货物打包叫作包装(packaging),现在把原子类比为球后,研究一下它们的堆积方法。物质,即使是相同元素,但由于排列方法不同也会表现出各种不同的性质。由球构成结构的单元是格子。面心立方晶格和最密六方晶格被称为最密堆积,也就是缝隙最小的堆积法。虽然金刚石结构不是最密堆积,可是以金刚石为主的很多物质取得了这种原子排列。半导体并非都是单质物质,化合物砷化镓也是半导体,它也具有金刚石结构。

# 5 本征半导体及其性质

## □ 要点

完全不含杂质的半导体称为本征半导体。本征半导体的自由电子和空穴浓度是相同的。费米能级处在禁带的中间。本征半导体的电阻率在温度升高时减小。

## □ 解释

本征半导体

### ● 本征半导体的晶体结构

完全不含杂质的半导体称为本征半导体。代表性的本征半导体有单质的硅(Si)和锗(Ge),有化合物的砷化镓(GaAs)等。图 2.15是由硅构成的本征半导体的模型图。各个原子都相互有 4 个价电子连结,而形成共价键。半导体的共价键因为能形成金刚石结构,其平面图如图 2.15 所示,半导体的价电子带因为电子轨道都被电子充满的满带,所以,电子很容易从邻近原子移动到空穴中去。自由电子和空穴担负着导电的作用,所以称其为载流子。因为空穴是价电子跳出的位置,所以在本征半导体情况下,自由电子和空穴的载流子浓度是相同的。

载流子

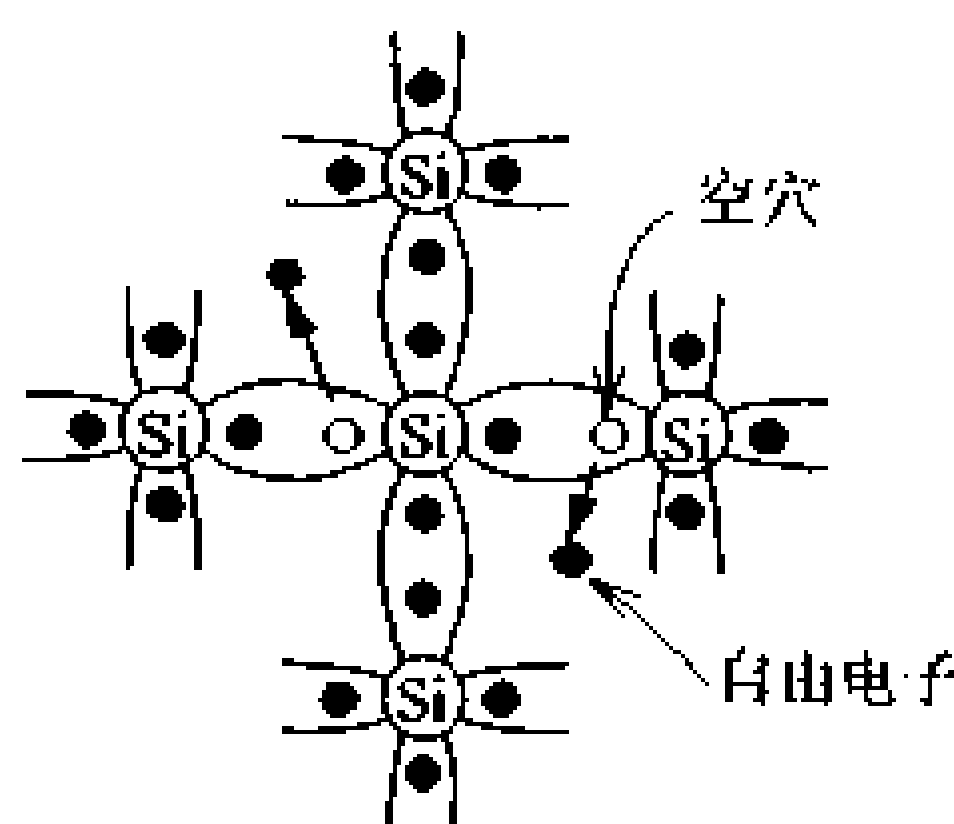


图 2.15 本征半导体的晶体结构

### ● 能带结构

图 2.16 给出了本征半导体的能带和费米-狄拉克分布函数。带隙约有 1eV 左右,在室温下所有电子都不能跨越这个带隙。热激励到导带上的电子数,其几率可用费米-狄拉克分布函数给出。费米能级是以绝对零度为界并形成一个台阶状。因为费米能级也是电子具有能级的平均值,所以,在本征半导体的情况下,能级的平均值处在禁带的中间。

费米能级

### ● 本征半导体的导电机理

漂移电流

把由电场原因而引起的电流称为漂移电流。本征半导体受热

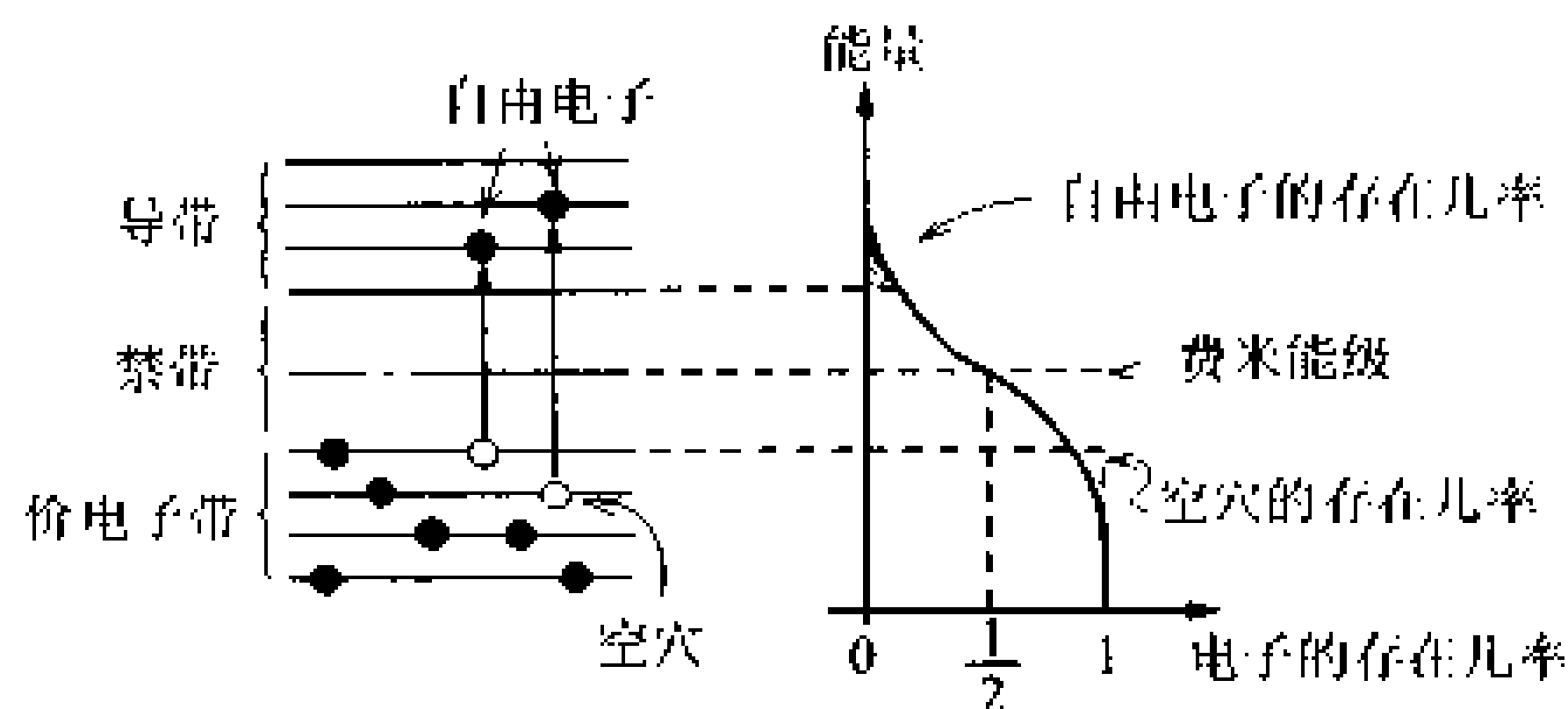


图 2.16 本征半导体的能带

激励的自由电子和空穴是以载流子形式给出的。在半导体上加一电压，由于电场关系，自由电子向电源正极移动，而空穴向负极移动。假如自由电子和空穴相遇，它们则复合而消灭。另外，假如受热激励而产生自由电子，那么与此同时，也产生空穴（图 2.17）。

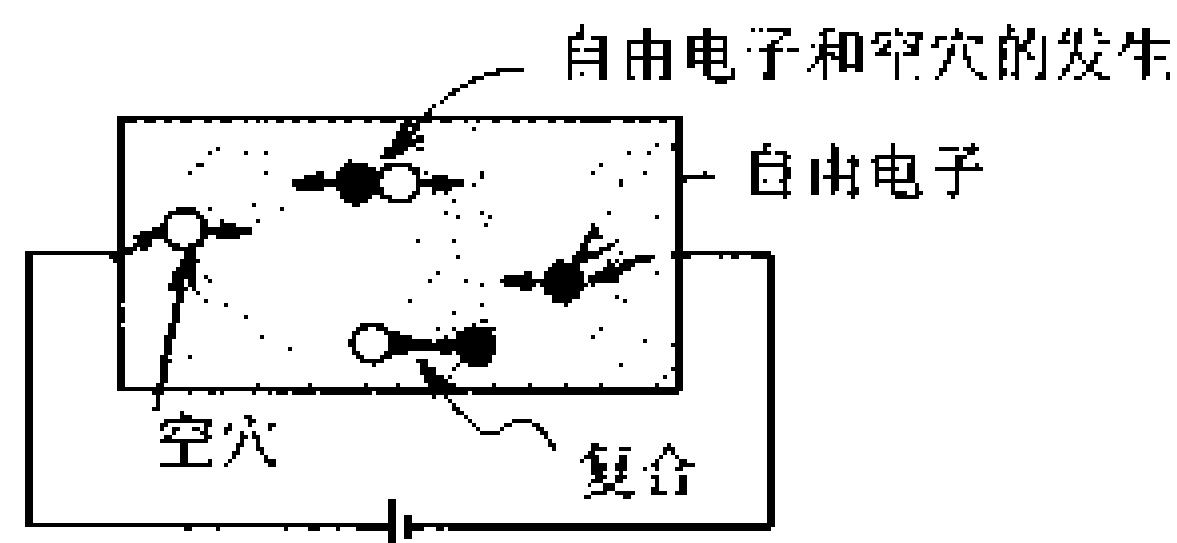


图 2.17 本征半导体中载流子的迁移

### 晶格振动

参与本征半导体导电的是载流子（自由电子和空穴）。本征半导体的载流子是由热激励而产生的，它的浓度随温度的上升而增加。但是与此同时，也会出现妨碍导电的晶格振动。晶格振动是受热激励的原子振动。因此，这种障碍会随温度上升而加剧。不过，当载流子的增加大于由晶格振动而引起的障碍时，就会对导电有利。因此，半导体的电阻率随温度增加而减小。

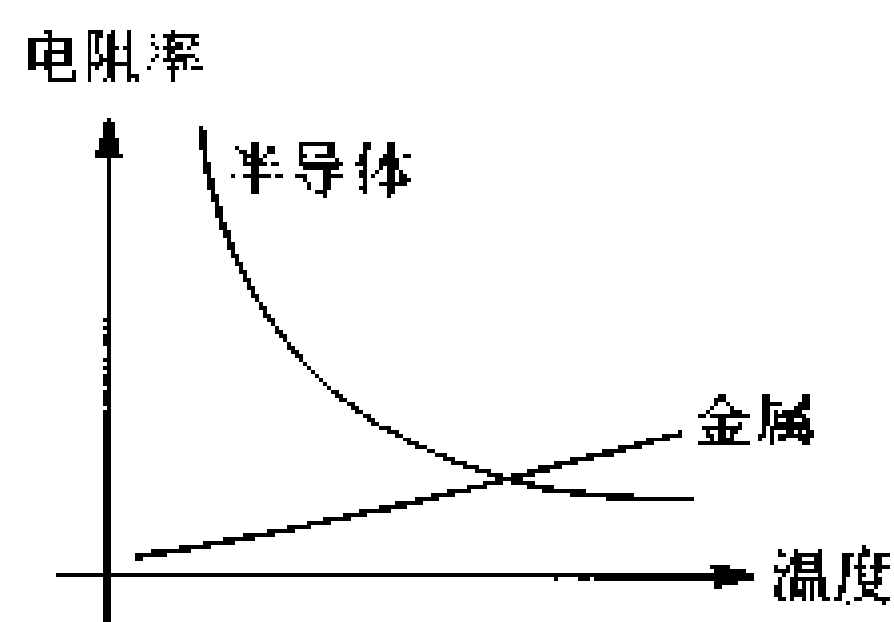


图 2.18 电阻率随温度的变化

### 扩散电流

在金属情况下，参与导电的载流子只有自由电子。因为这种自由电子的浓度即使温度上升也不改变，所以金属的电阻率是随温度上升而增加的（图 2.18）。流过半导体的电流中除上述电流之外还有扩散电流。扩散电流是由载流子浓度之差而引起的。

# 6 p 型半导体及其性质

□ 要 点

p 型半导体中空穴是多数载流子。杂质能级处在紧靠满带的上边。费米能级处在禁带中间之下和杂质能级之上。

□ 解 释

杂质半导体

## ● p 型半导体的晶体结构

将本征半导体中添加极微量的某种杂质的半导体称为杂质半导体。添加的杂质在禁带中形成一个新杂质能级。其结果是产生新的空穴和自由电子。杂质半导体根据添加杂质的价电子数决定形成 p 型半导体或形成 n 型的。

p 型半导体

p 型半导体是添加三价杂质元素的情况。添加的三价杂质元素(In),使硅原子共价键缺了 1 个价电子(图 2.19)。价电子缺少的地方就成为空穴,空穴能够从相邻原子接受电子。这时,称添加杂质为受主。另外,将这种杂质半导体称为 p 型半导体,而且空穴成了多数载流子。

受主 p 型

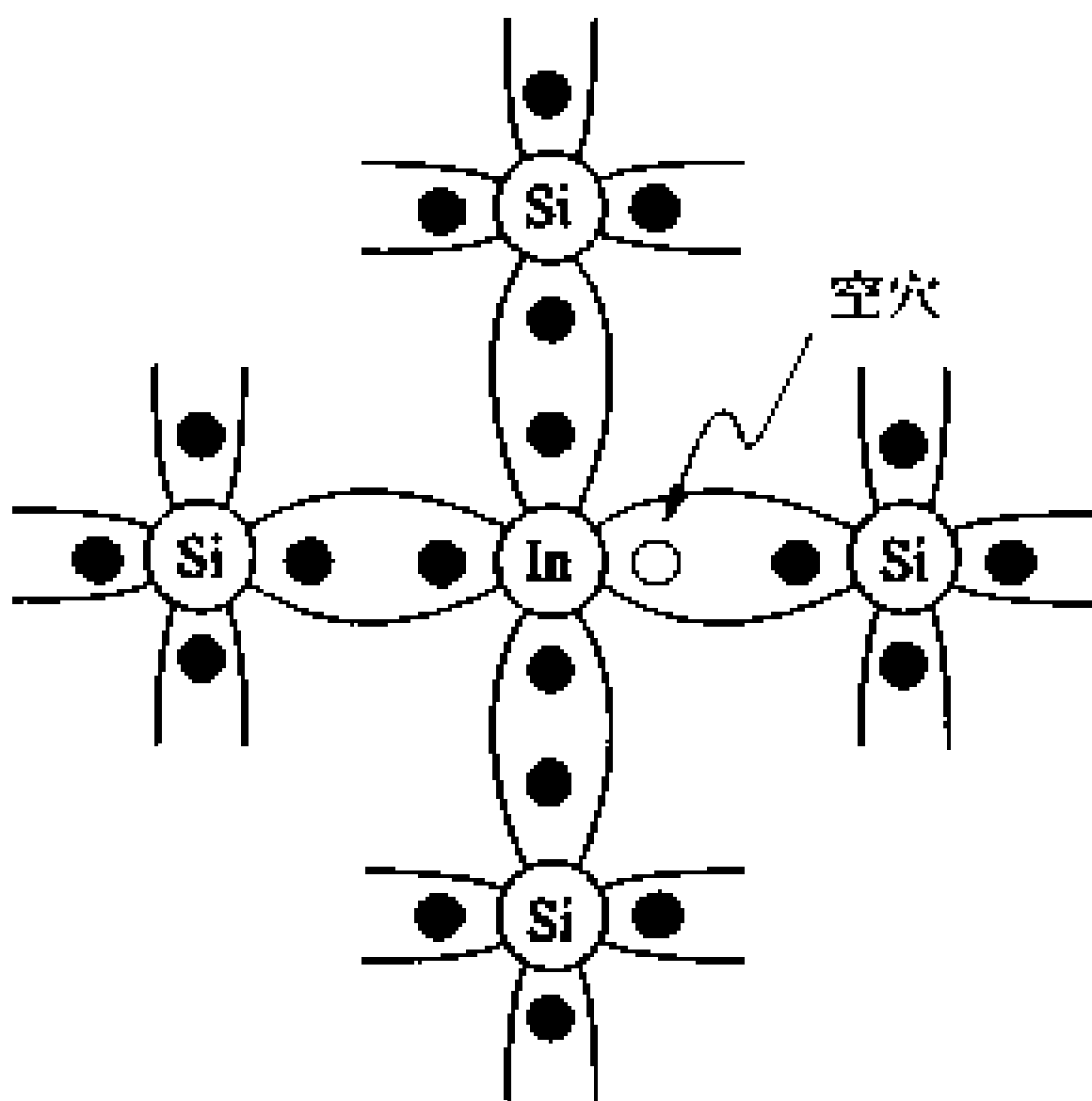


图 2.19 p 型半导体的结晶结构

## ● p 型半导体的能带

受主能级

图 2.20 是用能带描绘空穴发生的情形。由受主形成的杂质能级称为受主能级。价电子带的电子很容易被激励到受主能级上。这是因为受主能级处在紧靠价电子带的上顶。又因为费米能级是电子具有能级的平均值,所以受主能级在禁带中间之下,在杂质能级之上。



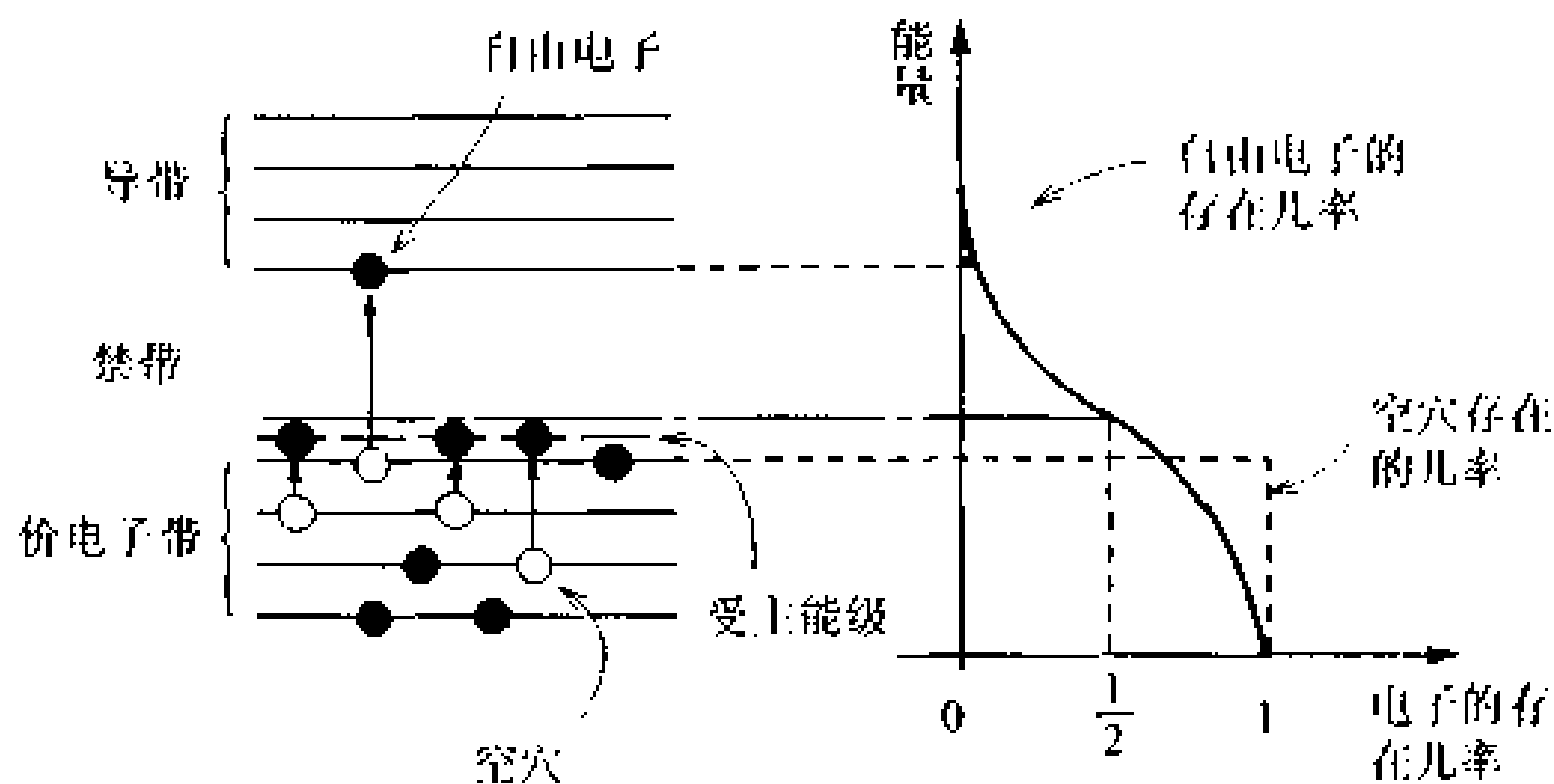


图 2.20 p 型半导体的能带

### ● 漂移电流

少数载流子  
多数载流子

尽管 p 型半导体也有自由电子,可是与空穴相比因为少得多,故称自由电子为少数载流子。与此相对应,因为空穴比电子多,故称其为多数载流子。

在 p 型半导体上加电压,空穴就成为电流的主体。因为空穴被认为是正的荷电粒子,所以它向电池的负极移动。自由电子相反,它向正极移动(图 2.21)。

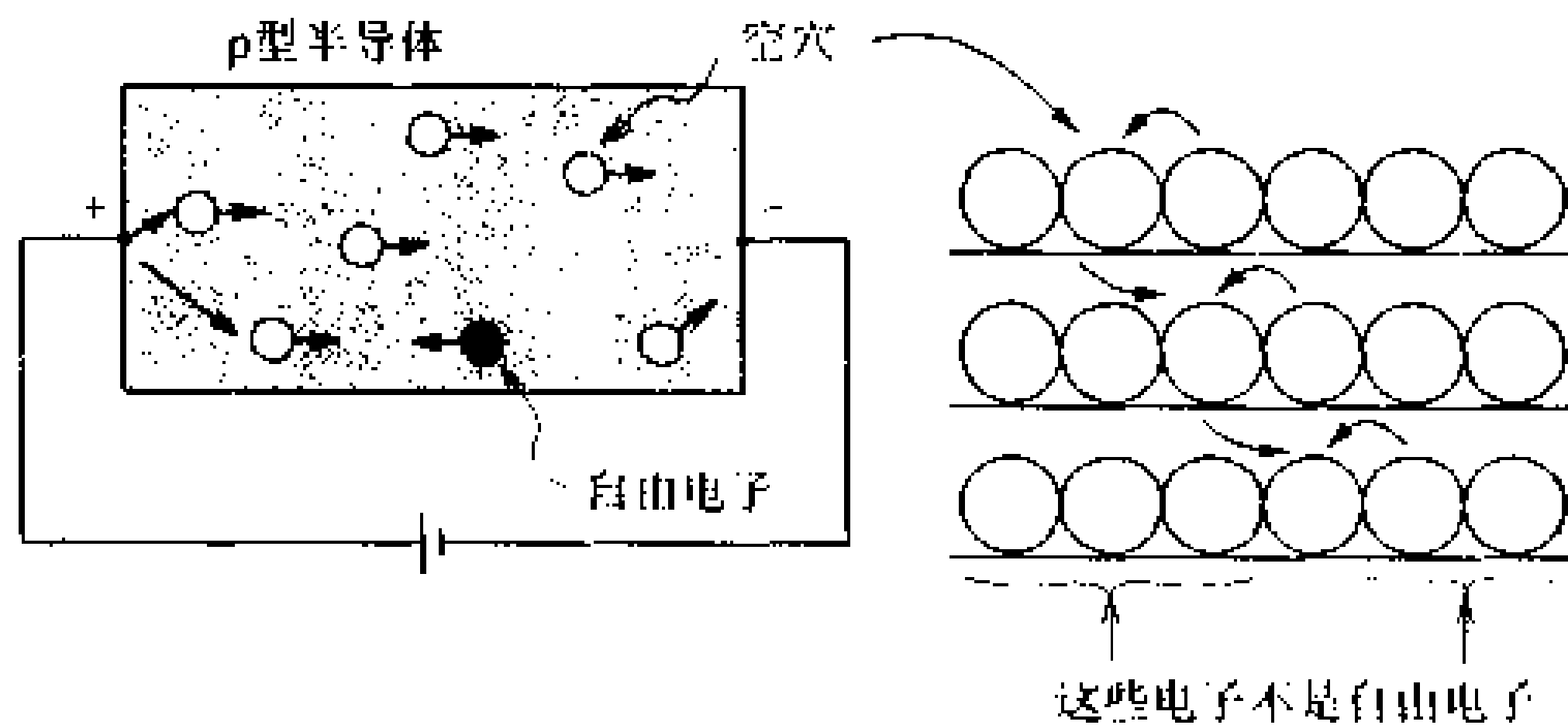


图 2.21 p 型半导体中载流子的迁移

## 7 n 型半导体及其性质

要 点

n 型半导体, 自由电子是多数载流子。杂质能级位于紧靠导带的下方。费米能级位于禁带中间之上, 杂质能级之下。

□ 解 释

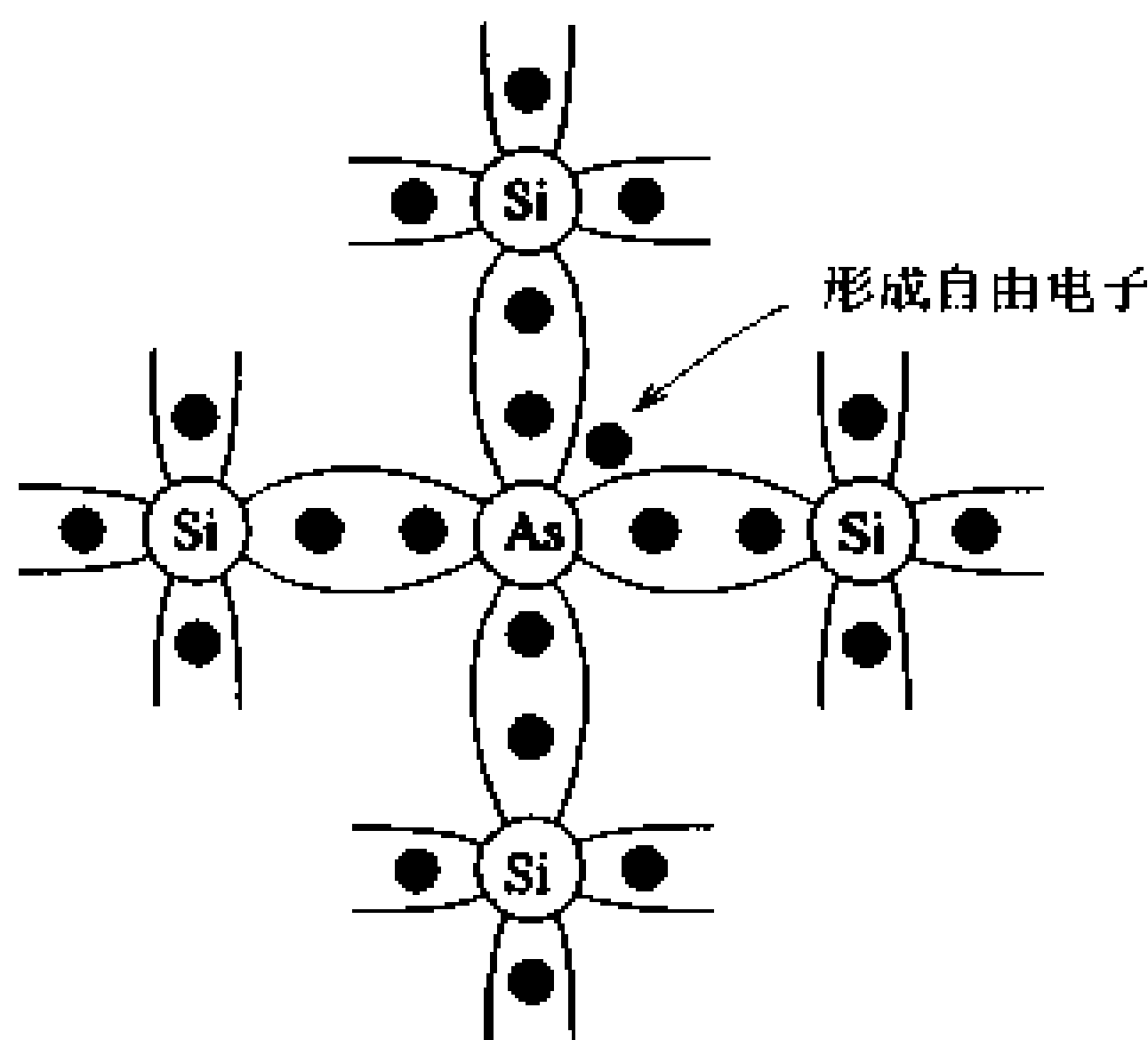
## n 型半导体

■ 型  
施主

### ● n 型半导体的晶体结构

**n 型半导体**中的杂质是 5 价元素。如果在本征半导体硅中添加极微量的 5 价砷(As)杂质,如图 2.22 所示,每个砷(As)原子有一个价电子不参与共价键。称含这种杂质的半导体为 **n 型半导体**。这时将添加的杂质称为**施主**。过剩施主的价电子能很容易逃脱原子的束缚而自由移动。这种由杂质提供的价电子,就成为 n 型半导体的多数载流子。

价电子逃脱后的砷原子虽然带正电,但它是不能移动的固定电荷。 $n$ 型半导体只是起到使多数载流子成为自由电子的作用,这种情况和  $p$  型半导体相同。



**图 2.22 n 型半导体的晶体结构**

## ● 能带结构

图 2.23 是用能带来描绘自由电子发生的情形。由施主形成的杂质能级称为施主能级。从施主能级很容易将电子激励到导带上。受激励的电子在导带中成为自由电子。因为费米能级是电子具有能级的平均值,所以它位于禁带之上,而位于杂质能级之下。

施主能级

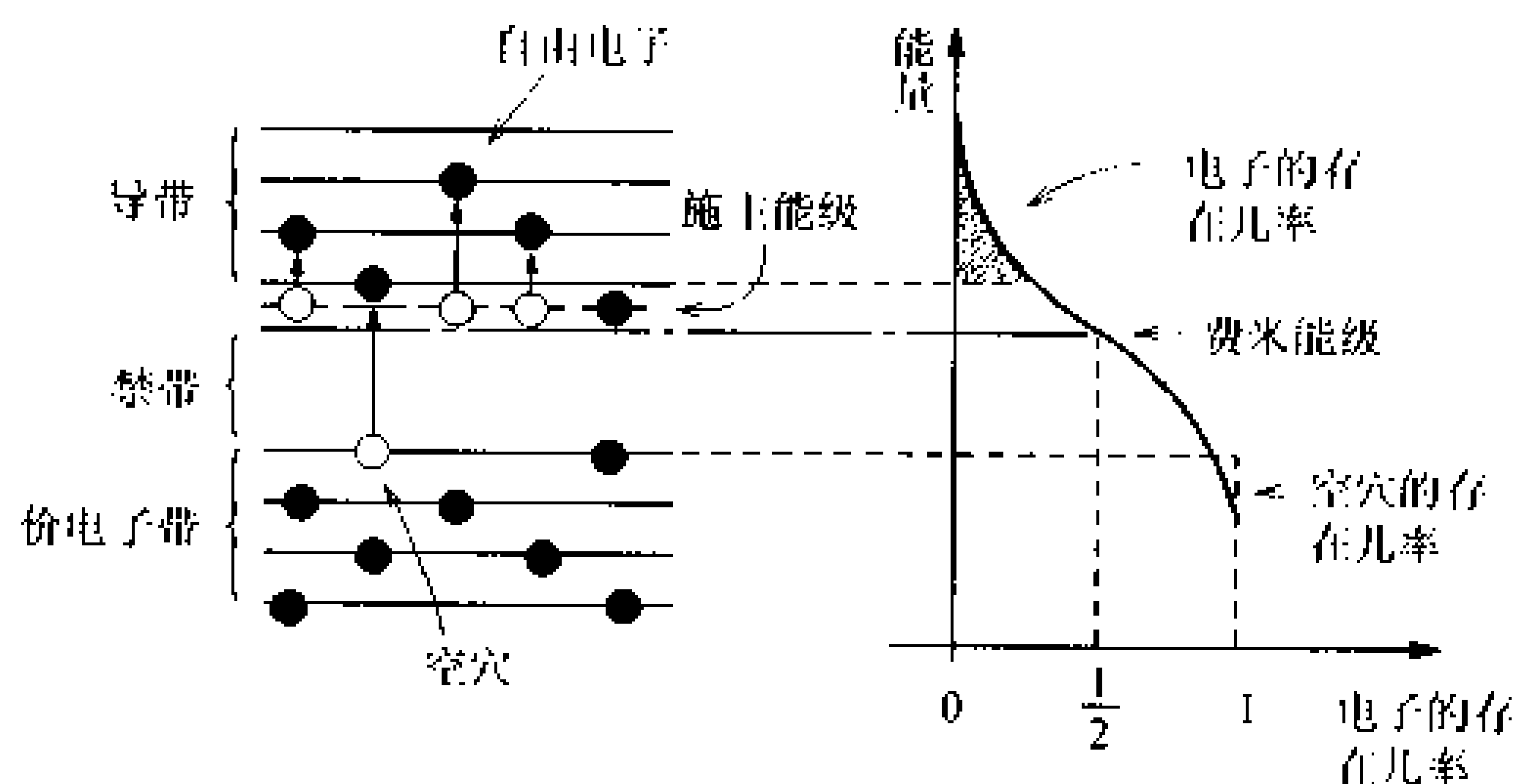


图 2.23 n 型半导体的能带

### ● 漂移电流

如图 2.24 所示,在 n 型半导体上施加电压,自由电子受电场的吸引移向电源正极。从半导体中逃脱的自由电子,因为可由电源补充,故晶体仍保持电中性。

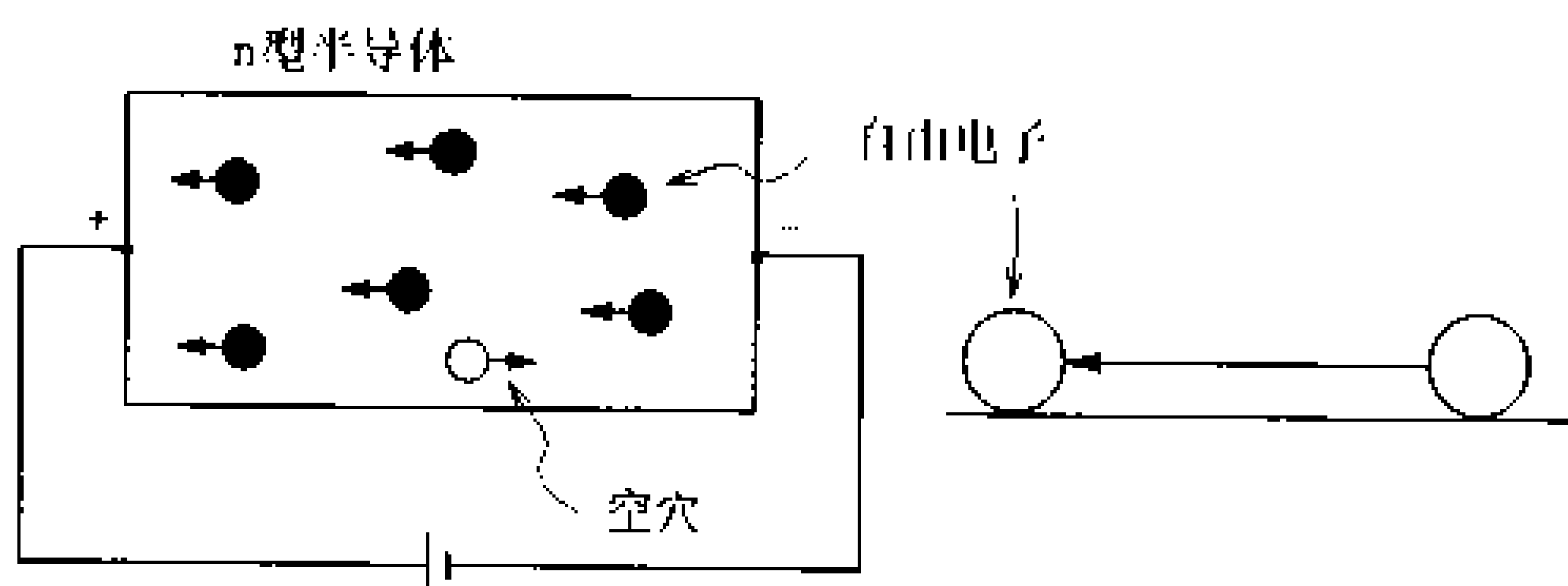


图 2.24 n 型半导体中的载流子的迁移

## □ 相关知识 ● 载流子的迁移率

自由电子和空穴这两类载流子的迁移率(单位电场作用下载流子的迁移速度)是不同的。虽然杂质浓度和温度条件相同,可是 n 型半导体的电阻率比 p 型的小。这是由于自由电子比空穴的迁移率大的缘故。所以自由电子作为载流子它比空穴更容易移动。因为空穴是电子逃脱的空位,所以移动起来的电子又不能不在空穴中停留,而导带中的自由电子可不停止地进行移动。如用火车来比喻,这和各站都停车的火车与特快的火车不同相类似。

载流子的迁移率决定电子元器件的工作速度。自由电子的迁

移率比空穴大,这就成为半导体元器件向 n 型半导体发展的理由。

### ● 迁移率

将单位时间通过单位面积的电荷总量定义为电流密度  $j$ 。如果物质中单位体积中载流子浓度为  $n$ ,载流子迁移速度为  $v$ ,每个载流子的电量为  $e$ ,那么

$$j = n \cdot v \cdot e \quad (2.6)$$

这里载流子的迁移速度  $v$  是由电场决定的漂移速度。这个速度在电场小时,与电场大小成正比。因此,

$$v = \mu E \quad (2.7)$$

式中的  $\mu$  为迁移率。 $\mu$  就是加单位电场时的载流子的迁移速度(图 2.25)。

迁移率  $\mu$  的单位是  $[\text{m/s}]/[\text{V/m}]$ 。我们来比较一下硅在温度为室温(300K)情况下的自由电子和空穴的迁移率。在电场为  $1\text{V/m}$  时,它们大约为

自由电子的  $\mu = 0.15\text{m/s}$

空穴的  $\mu = 0.05\text{m/s}$

如果换算成时速, $\mu$  分别为  $0.54\text{km/h}$  和  $0.018\text{km/h}$  左右。

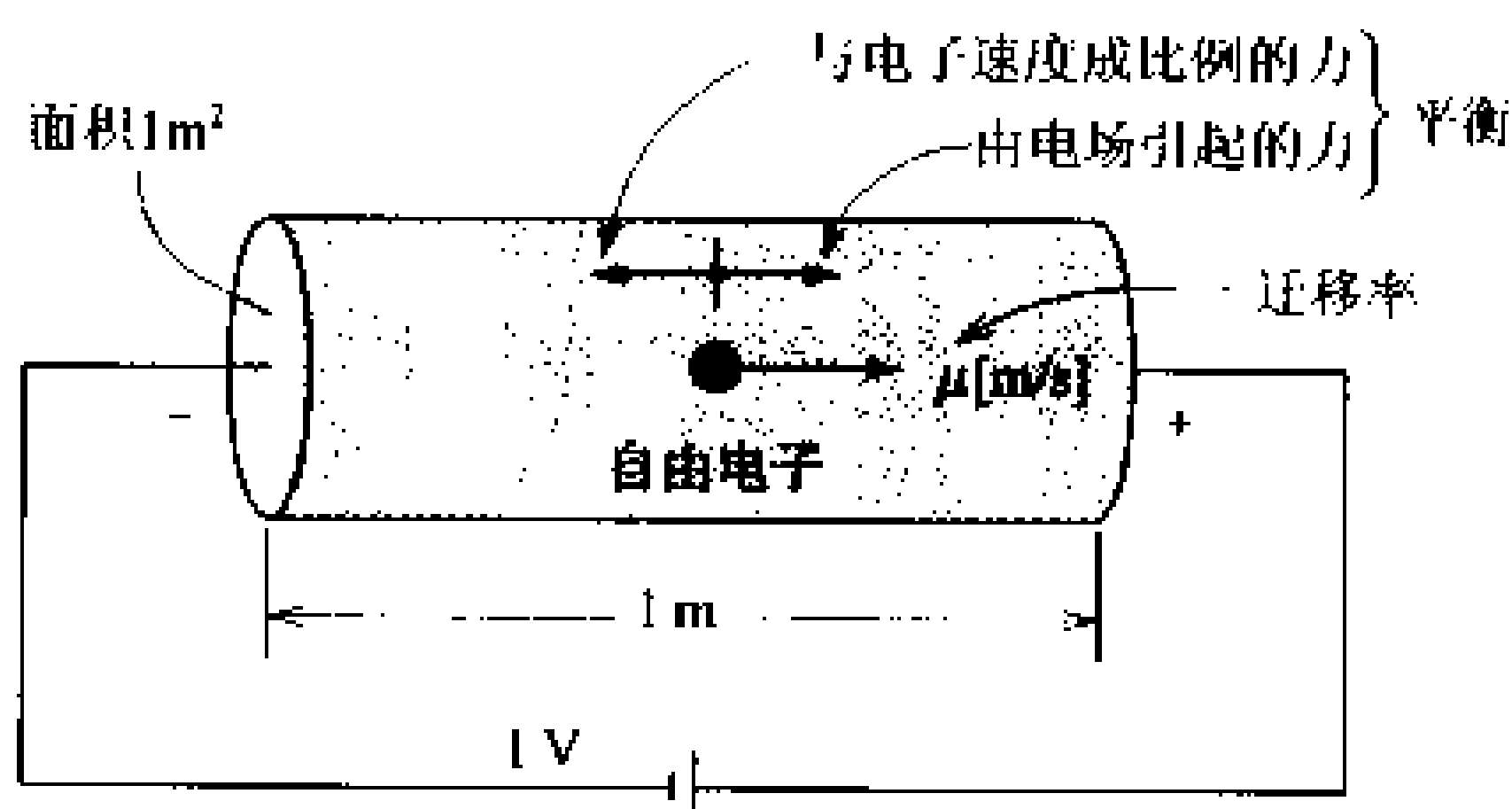


图 2.25 迁移率

## 8 二极管的结构及其工作原理

□ 要

点

pn 结二极管是 p 型半导体和 n 型半导体在单晶中, 形成 p 与 n 相邻的结构。在 pn 结处由于载流子扩散而有电位势垒产生, 施加电压后, 势垒厚度就会发生变化。

□ 解

释

### ● pn 结二极管的结构

二极管

pn 结

二极管意味着是两个电极的元件。pn 结二极管是在单一的半导体晶体中制成相邻 p 型区和 n 型区的结构。将 p 型区和 n 型区的结合面称为 **pn 结**。在 pn 结处, 即使不在两电极加电压, 由于扩散也有载流子移动。p 型区的多数载流子(空穴)向 n 型区扩散, n 型区多数载流子(自由电子)向 p 型区扩散。扩散的空穴和自由电子由于复合而消灭。消灭之后, 留下带电的杂质原子。其结果在接合面附近形成了载流子不存在的区域。称这个区域为**耗尽层**(或过渡层)。另外, 将移动到对方区域的载流子称为**注入载流子**。

耗尽层

注入载流子

固定电荷

在载流子缺少的耗尽层中, p 区内杂质带负电; n 区内杂质带正电。因为这些带电的杂质不能移动, 故称其为**固定电荷**。这些固定电荷在 pn 结处产生了电位差。这个电位差阻碍载流子的移动, 其方向是 p 型区为正, n 型区为负。所以, 称其为**势垒**, 其大小称为**势垒电压  $\Phi$** (图 2.26)

势垒

势垒电压

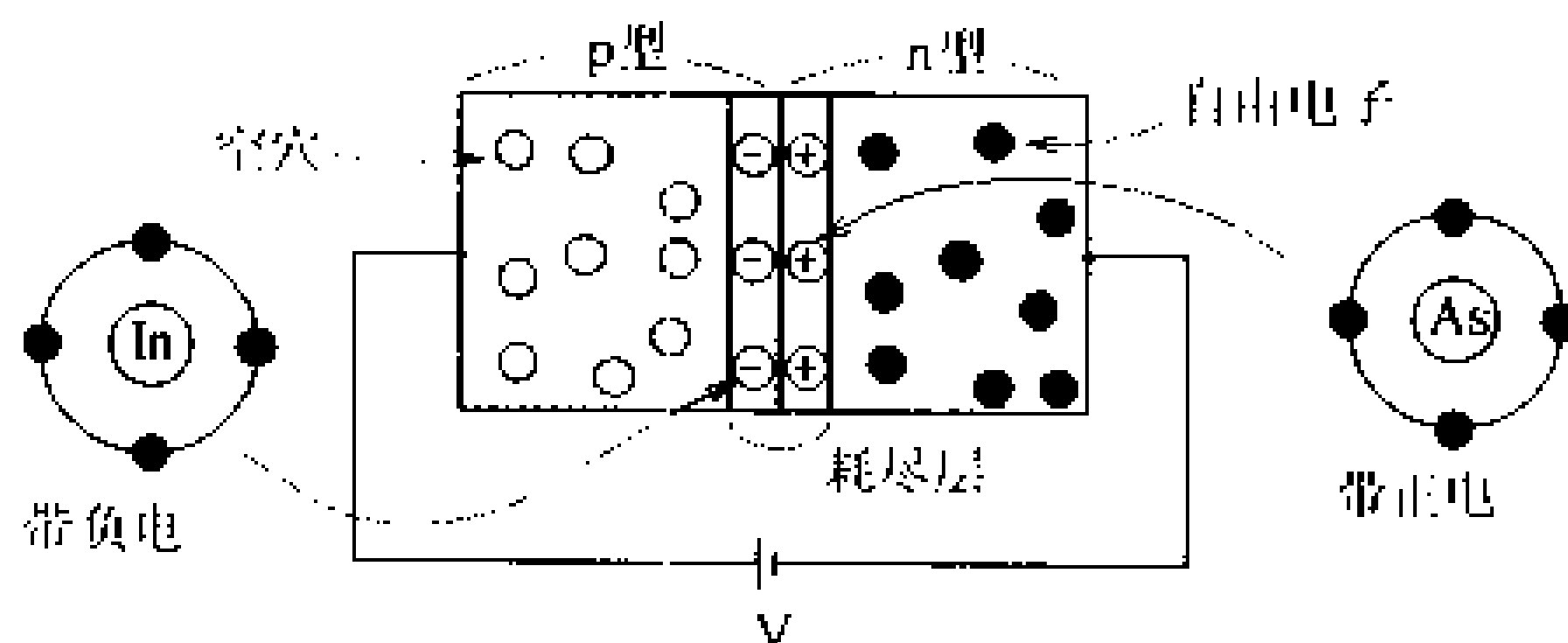


图 2.26 pn 结二极管的结构

### ● 能带结构

偏压

称加在 pn 结上的直流电压为**偏压**。不加偏压时, 在能带结构上, 费米能级处在 p 型区和 n 型区相等处(图 2.27)。这时即使用导线连接两电极也没有电流。这是因为在 pn 结处有势垒, 载流子

的自由电子和空穴不能迁移到对方区域。这种情形可以比喻为由水管连接着的两个水槽,水位相当费米能级,如果两个水槽的水位相等,水(相当于载流子)就不流动(图 2.28)。

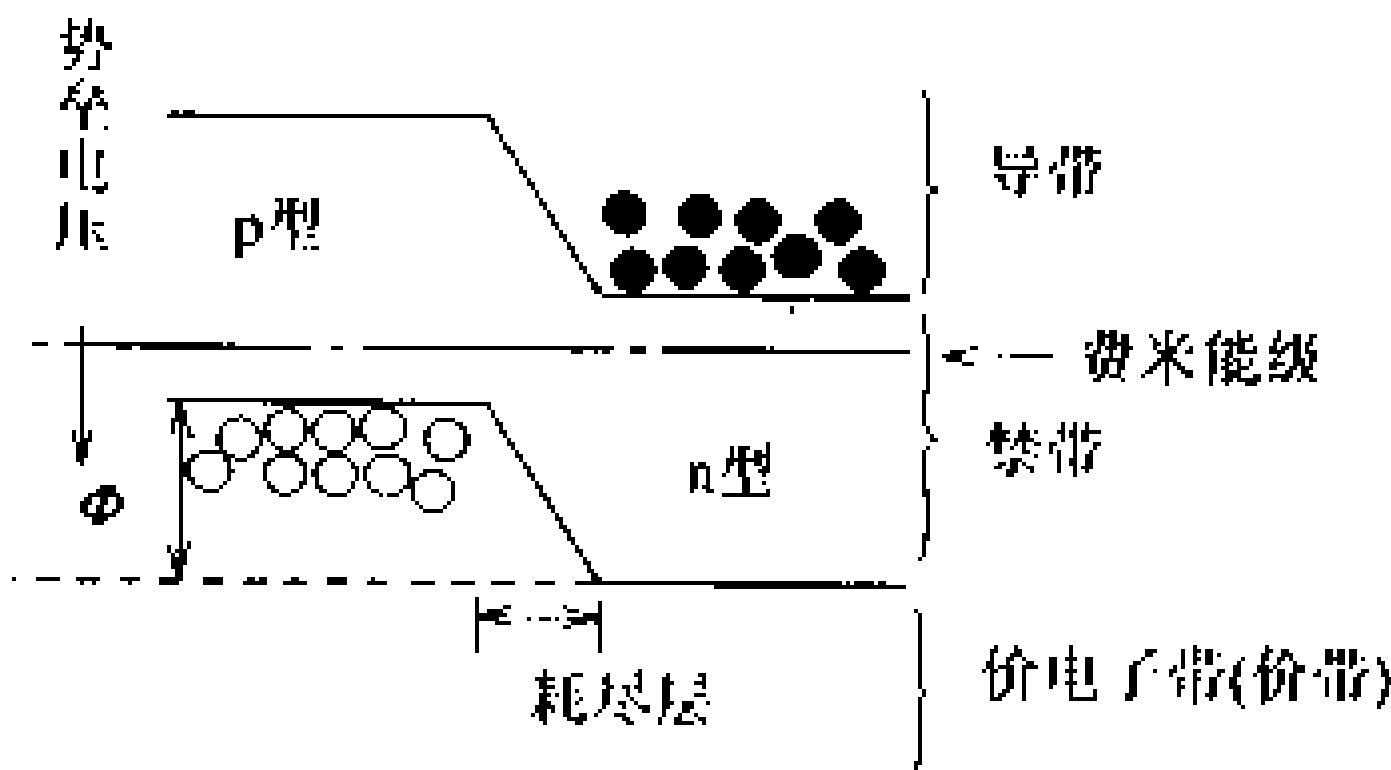


图 2.27 能带图

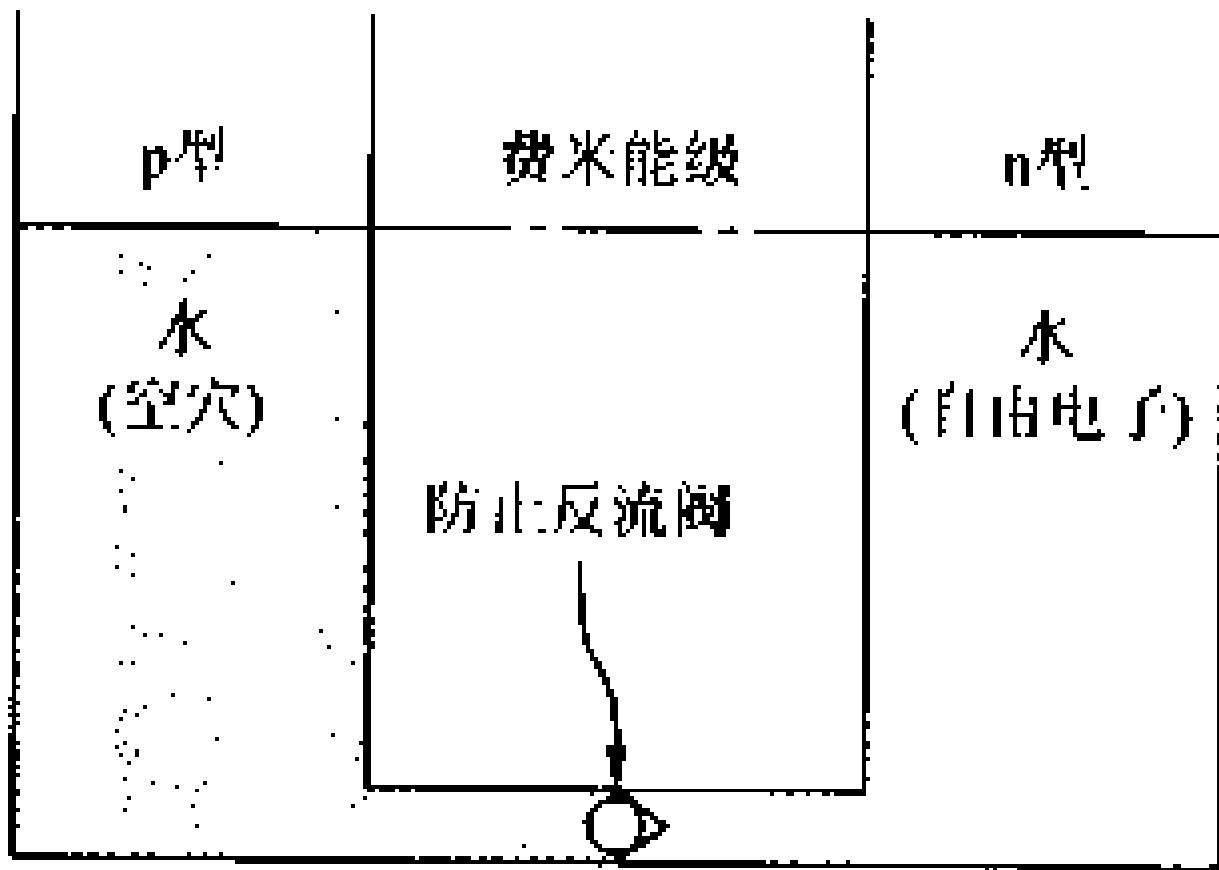


图 2.28 费米能级的比喻

● 二极管的符号

图 2.29 给出了二极管的符号。实际的二极管中,箭头方向表示它导通的方向。

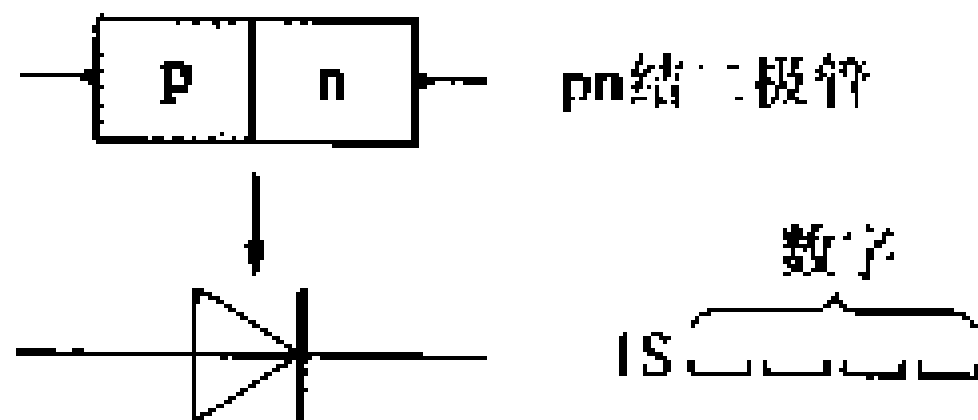


图 2.29 符号和型号

## 9 二极管的特性和使用方法

**□ 要点** 二极管有整流作用,对于反方向电压有击穿现象发生。二极管都有最大额定电压值。

**□ 解释** ● 二极管的特性

整流

阳极 阴极

加正向偏压

加反向偏压

击穿电压

只让电流向一个方向流动称为整流。把为了进行整流的电子元件叫二极管。二极管是用半导体的 pn 结制成。把连接 pn 结的 p 侧的电极称为阳极,连接 n 侧的称为阴极。对阳极加正电压,阴极加负电压时,称加正向偏压。与此相反,阳极加负电压,阴极加正电压时,称加反向偏压。二极管的功能因为是单向通过电流,所以在理想情况下,正向加电压时电阻为零,反向时,电阻为无限大。正向电流因为势垒电压的关系,所以它不能随电压立即增加。在反向情况下,这时有由于少数载流子而引起的微小电流和可能出现被叫作齐纳击穿的击穿现象发生。击穿现象是由于过高的反向偏压而引起 pn 结被击穿所致。引起击穿现象的电压称为击穿电压(图 2.30)

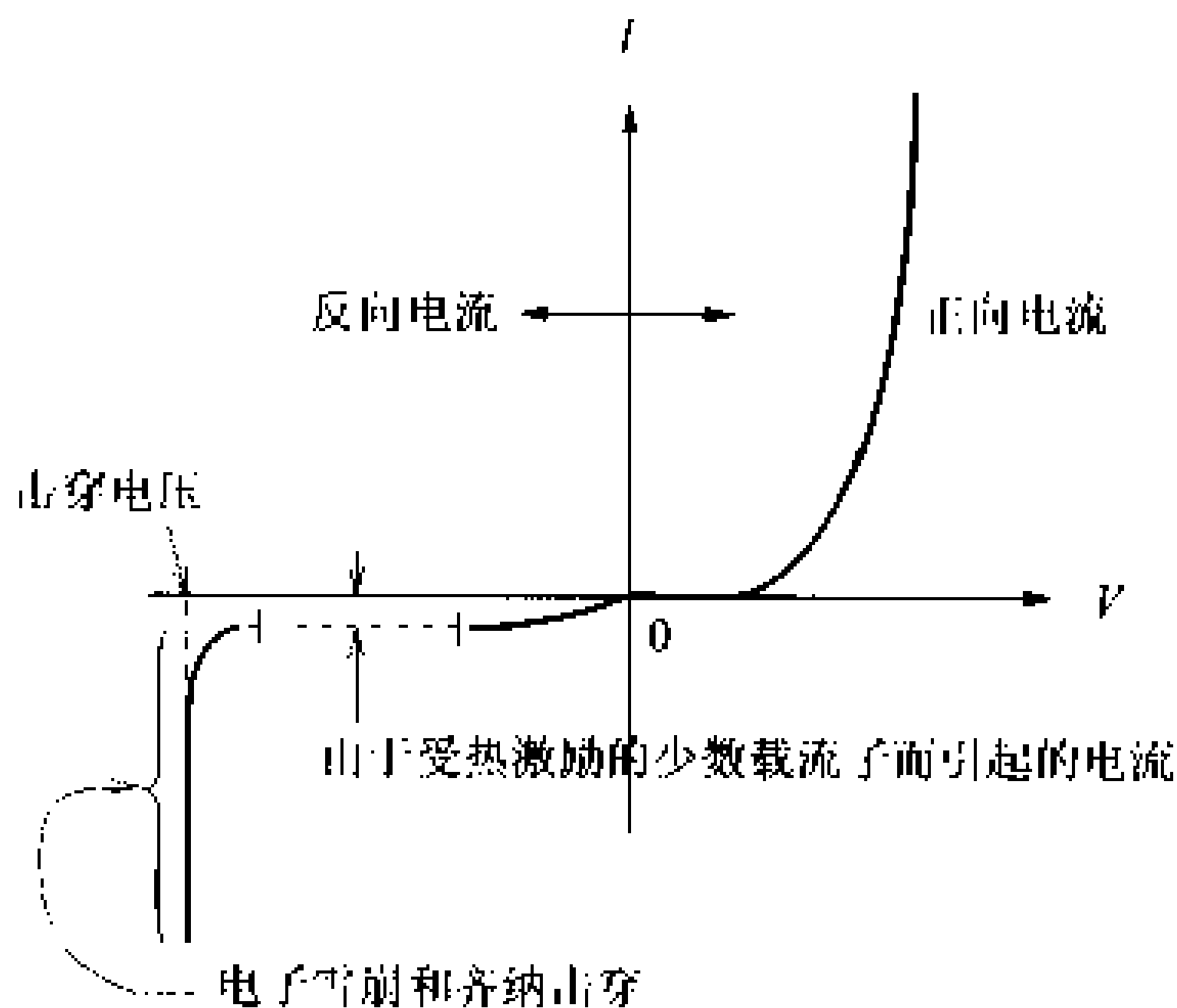


图 2.30 二极管的特性

● 二极管的最大额定电压

最大额定值

为了保障二极管能正常而安全地使用,对它的电流和电压以及使用温度都规定了使用的上限。把这个界限值称为最大额定值。

● 能带结构

对二极管加正向偏压时，p 型区域的费米能级与 n 型区域相比相对降低了，偏压使势垒电压减小，其结果，多数载流子的自由电子和空穴能够很容易移动到对方区域(图 2.31)。

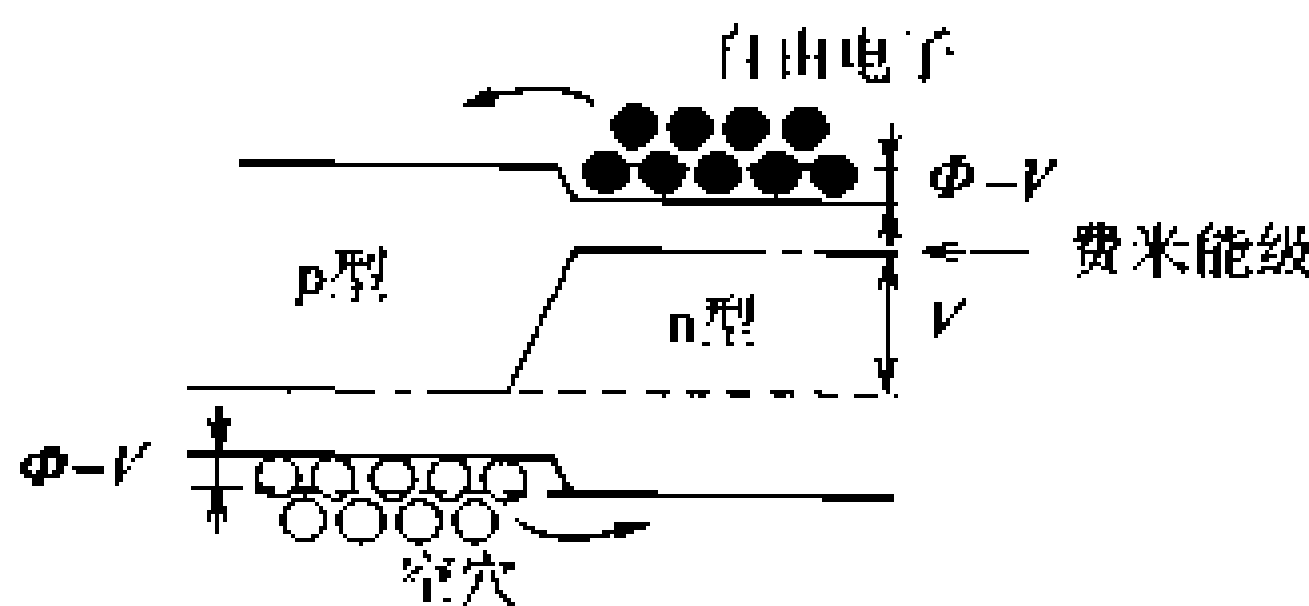


图 2.31 能带结构(加正偏压时)

反过来加反向偏压时，p 型区域的费米能级与 n 型区域相比相对增高了，偏压使势垒电压增高了。其结果，多数载流子的自由电子和空穴不能移动到对方区域。但是，对于由热激励而产生的少数载流子的自由电子和空穴来说，因为这个偏压是正向的，所以能使它们移动到对方区域。自由电子能够从费米能级高的区域流向低的区域，空穴能从费米能级低的区域流向高的区域(图 2.32)。

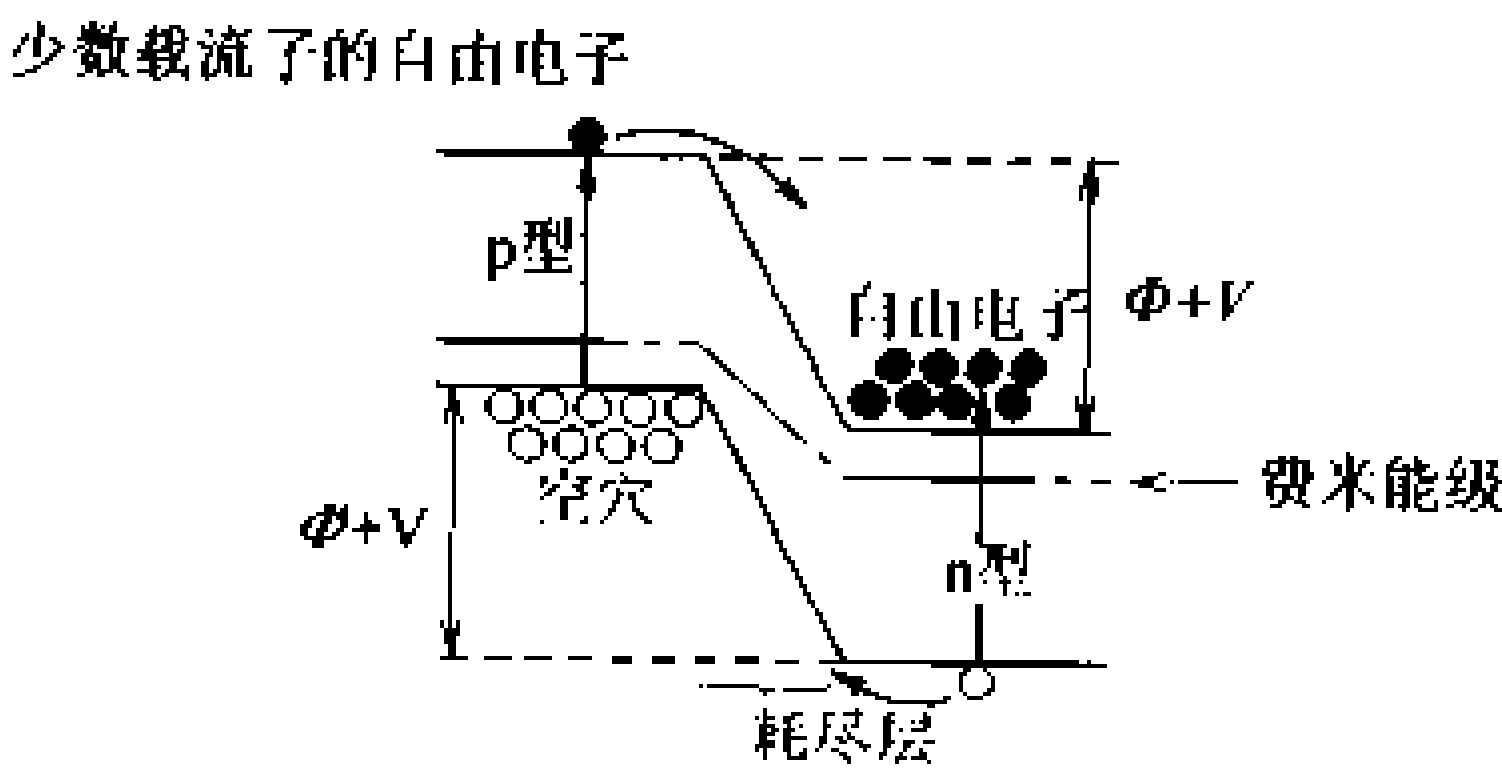


图 2.32 能带结构(加负偏压时)

□ 相关知识 ● 其它的二极管

- 齐纳二极管
- 光电二极管
- 发光二极管

除了用于整流的二极管外，还有用于产生固定电压的齐纳二极管(Zener diode)，和用于检测光电的光电二极管(photodiode)以及当电流流过时能发光的发光二极管(LED; light emitting diode)等很多种。



## 10 晶体管的基本构造

### □ 要点

晶体管是把 p 型和 n 型半导体配制成 pnp 或 npn 三层而制成的。分别把这三层称为发射极、基极和集电极。发射极和基极之间加正向电压,基极和集电极之间加反向电压。

### □ 解释

#### 双极晶体管

#### ● 双极(bipolar)晶体管的结构

本节所介绍的晶体管称为**双极晶体管**。之所以叫作双极型,是因为它是由二种类型的载流子(自由电子与空穴)进行工作的。如果只说晶体管通常是指双极型的。晶体管是在单晶中制成二个 pn 结(图 2.33)。这二个 pn 结是由一个单晶制成的,但是即使把二个二极管连接起来也不能成为晶体管。

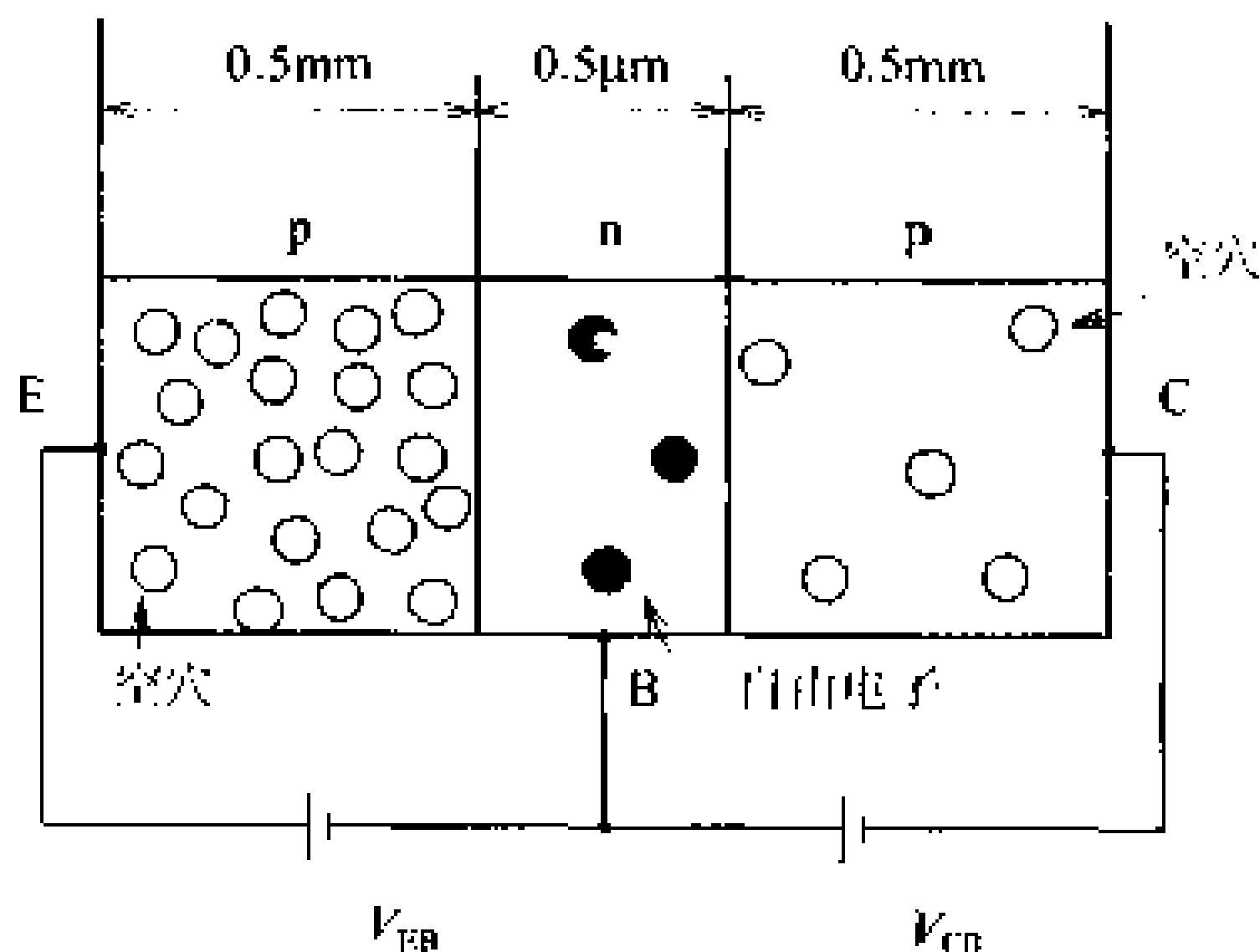


图 2.33 晶体管的结构

载流子浓度可使发射区变宽。当发射区的载流子浓度低时,就不能将载流子向基极区充分注入。同时,因为基极区窄,这有助于注入载流子的扩散。

#### ● 能带结构

晶体管的能带结构可以认为是二极管能带的应用。不加偏压时,费米能级在发射区、基区和集电区是相同的。费米能级相同,载流子由于 pn 结处的势垒关系,就不能移动(图 2.34)。

加了偏压后,各区域的费米能级产生了差。称发射区和基区

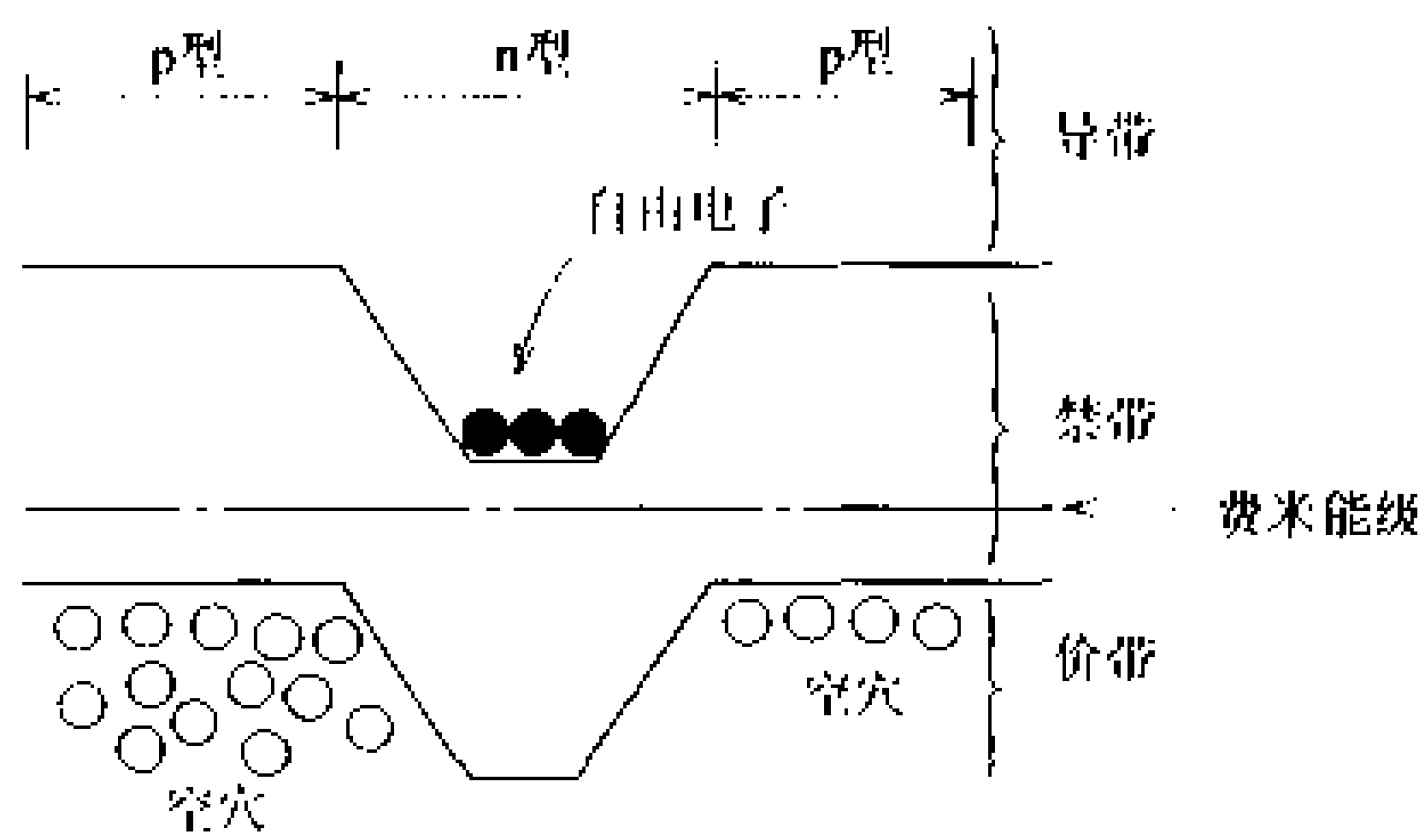


图 2.34 未加偏压时的能带结构

发射结  
集电结

之间的结合部为发射结。在发射结加上正向偏压时,发射区的费米能级相对基区的降低了。称集电区和基区的结合处为集电结。在集电结加上反向偏压时,集电区的费米能级相对基区的增高了(图 2.35)。

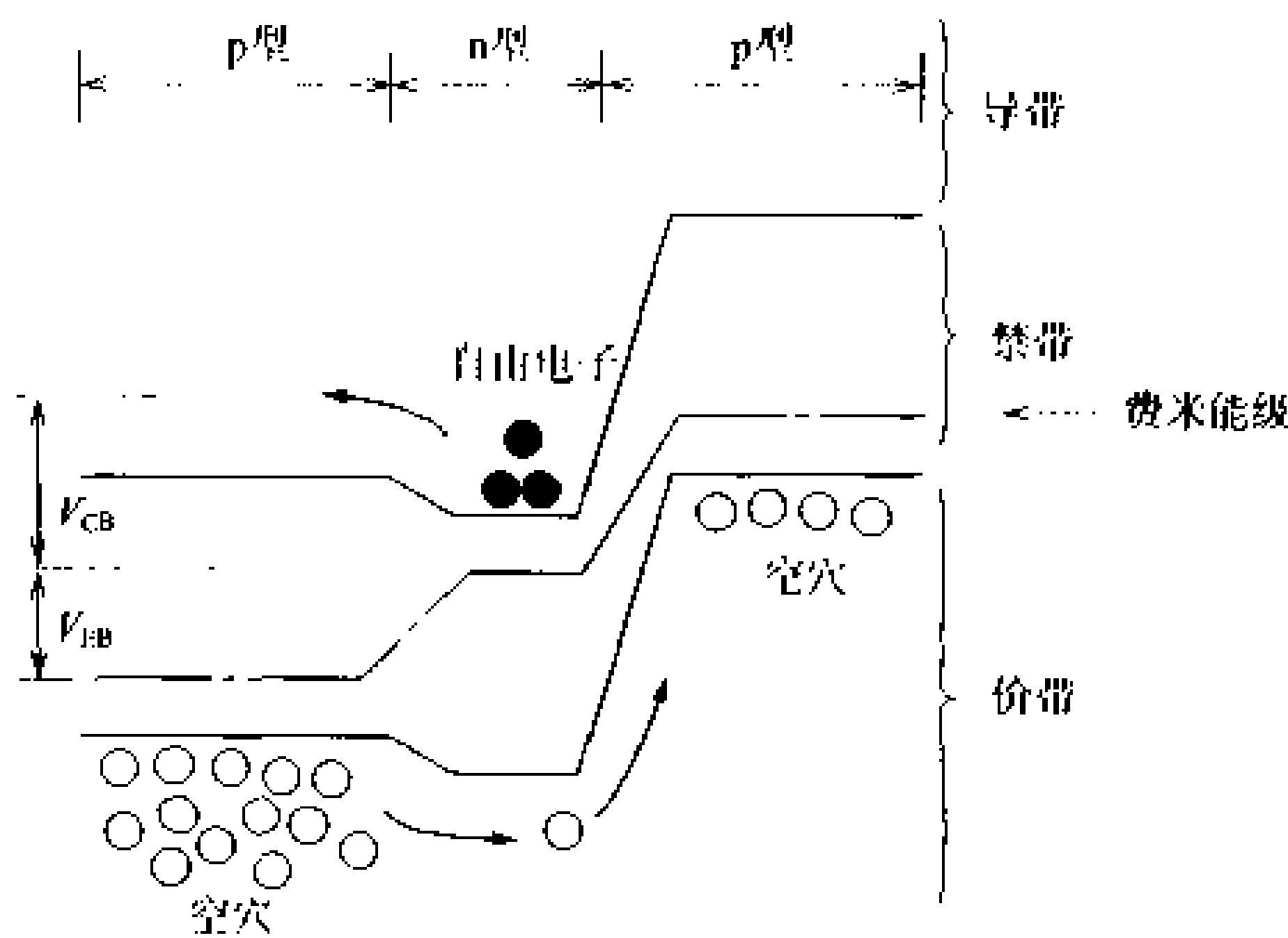


图 2.35 有偏压时的能带结构

## 11 晶体管的工作原理和静态特性

### □ 要 点

晶体管是由二种载流子进行工作的。基极电流控制着集电极电流。晶体管的静态特性是表示晶体管的输入和输出关系的。晶体管有放大作用。

### □ 解 释

#### ● 载流子的移动

晶体管和 pn 结二极管一样,其载流子是自由电子和空穴。现在我们来了解一下有关 npn 型的工作。晶体管的工作,可以看作是 pn 结二极管的应用。所以,这里把连接基极的电极分成两部分来看(图 2.36)。图中因为是在发射极和基极之间的 pn 结上加正向偏压,所以有多数载流子流动。另一方面,因为是在集电极和基极之间的 pn 结上加反向偏压,所以没有看到多数载流子流动。但是从发射极所注入的自由电子由于扩散流过基区,最后可到达集电区。因为在集电极加了大的正偏压,所以由扩散而移动的自由电子,被集电极吸引而产生了集电极电流。

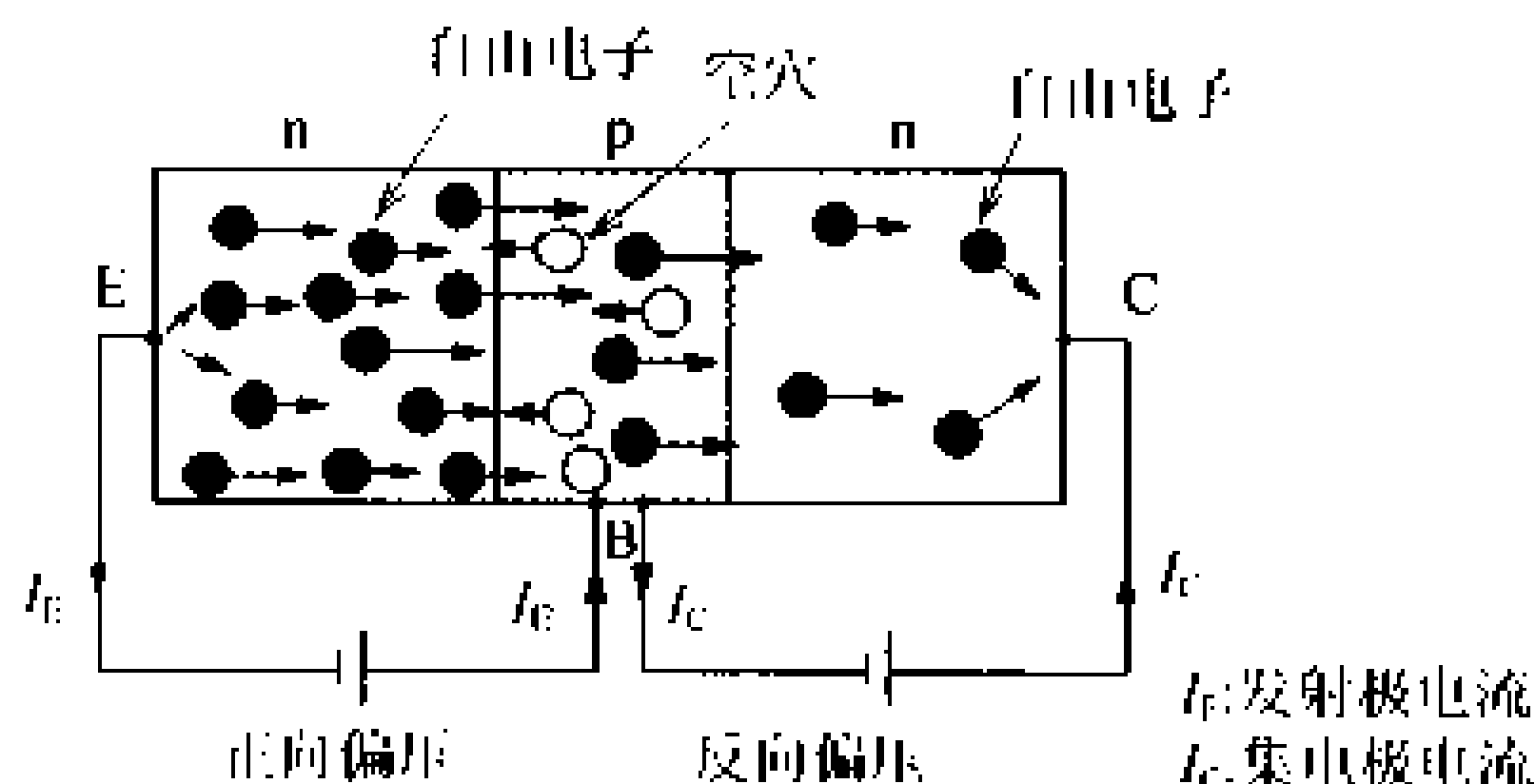


图 2.36 载流子的移动

#### ● 能带结构

来看一下加偏压时, npn 型晶体管的能带是怎样的? npn 型的情况也可和 pnp 型一样进行考虑。因为发射极和基极之间加了正向偏压,所以发射区的费米能级相对基极增高了。其结果发射极的自由电子大量注入到基极。因为集电极和基极之间加了反向偏压,所以集电极的费米能级相对基极降低了。其结果,经基区扩散出来的自由电子由于强电场关系,被吸引到集电极(如图 2.37)。

发射极向基极注入自由电子时,不就造成了时而发射极带正

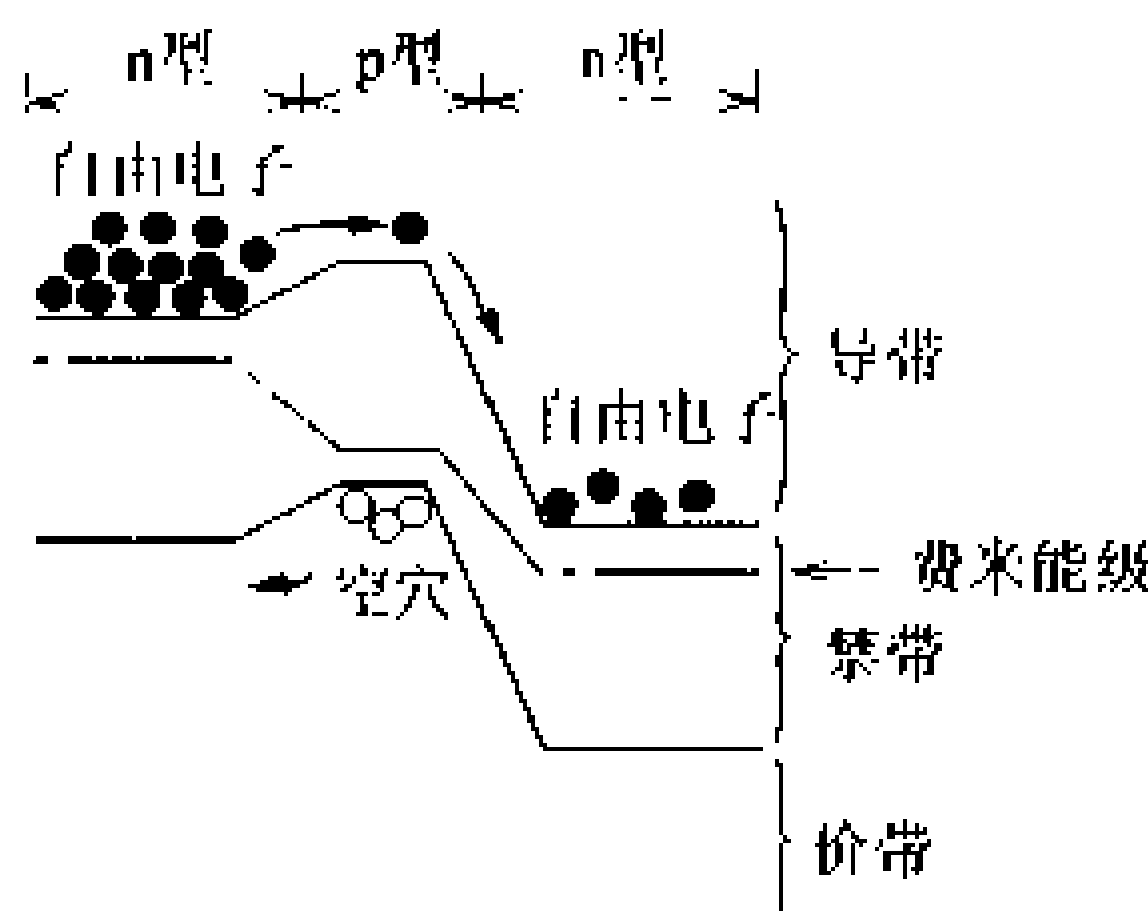


图 2.37 能带结构

电,时而基极带负电了吗? 因为 p 型半导体和 n 型半导体原本都是中性的,假如一会儿载流子流入,一会载流子流出,那么就会感到它们好像带电似的。但是,因为有偏压电源,所以晶体总是保持中性。这是因为从晶体流出自由电子(或空穴)后的缺少部分可从电源得到补充。关于再复合而消灭的情况也和上述情况相同。

● 静态特性的考虑方法

输出(电压与电流)与输入(电压与电流)的相对关系称为电路特性。当输入为直流时,这种输出与输入关系就是静态特性。输入为交流时,称其为动态特性。为了用图解给出输入(电压、电流)与输出(电压、电流)的关系(图 2.38)来讨论晶体管特性,可如图 2.39 那样取坐标轴。

静态特性  
动态特性

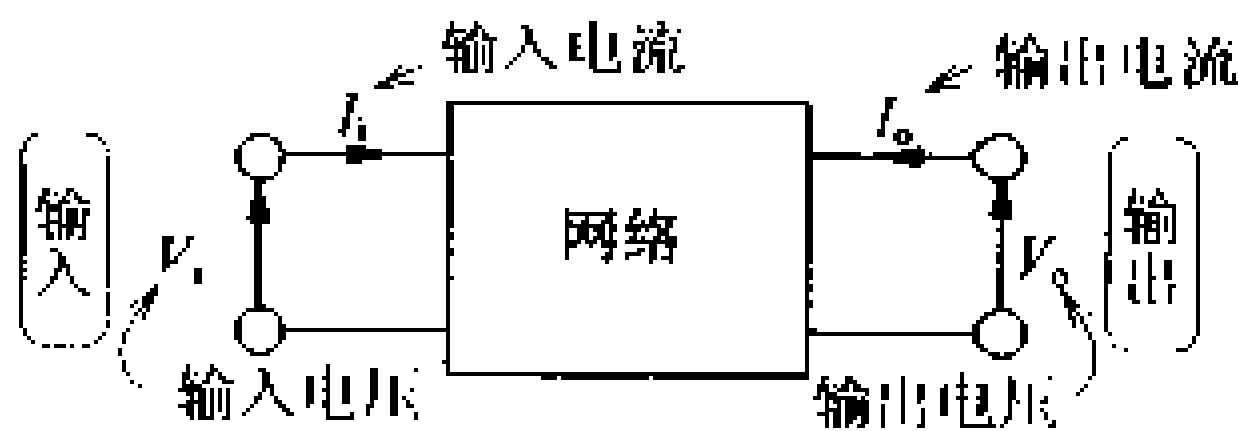


图 2.38 网络的输入输出

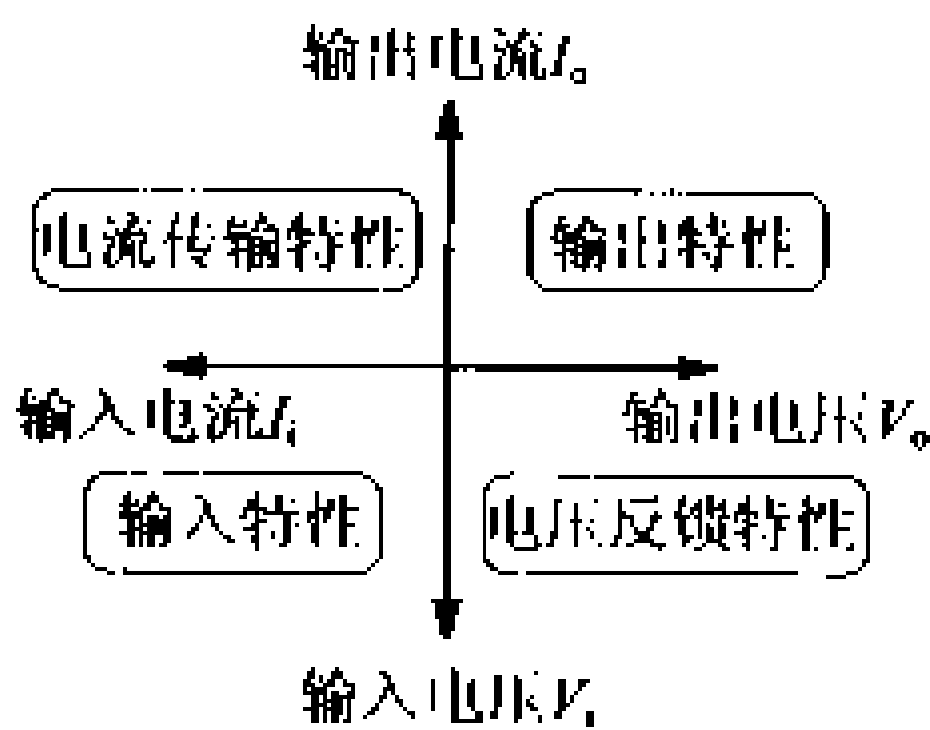


图 2.39 静态特性的表示方法

输出特性  
电流传输特性  
输入特性

第一象限表示输出电压和输出电流的关系,称其为输出特性。第二象限表示输入电流和输出电流的关系,称其为电流传输特性。第三象限表示输入电流和输入电压的关系,称其为输入特性。第

## 电压反馈特性

四象限表示输出电压和输入电压的关系,称其为电压反馈特性。

在发射极、基极和集电极之中,由于把它们作为输入端和输出端的不同而静态特性亦不同。输入端和输出端的选法不同,决定着放大的种类(电压放大或电流放大)。

### ● 晶体管的静态特性

晶体管的静态特性,随着以哪个极作为输入输出端和接地端的不同而不同。将基极作为输入,集电极作为输出和发射极作为接地的使用方式称为发射极接地。在发射极接地情况下,电压和电流都能放大。这里想举出一个经常使用的发射极接地的静态特性实例(图 2.40、2.41)

## 发射极接地

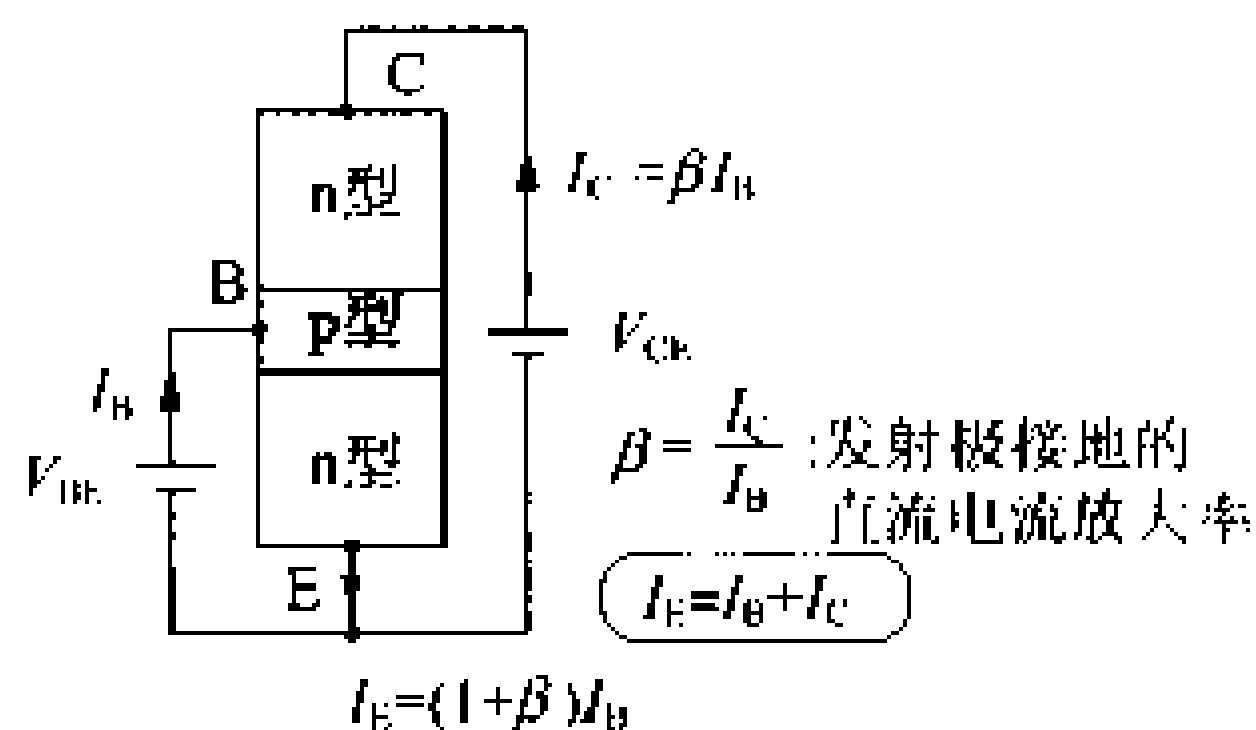


图 2.40 晶体管的发射极接地

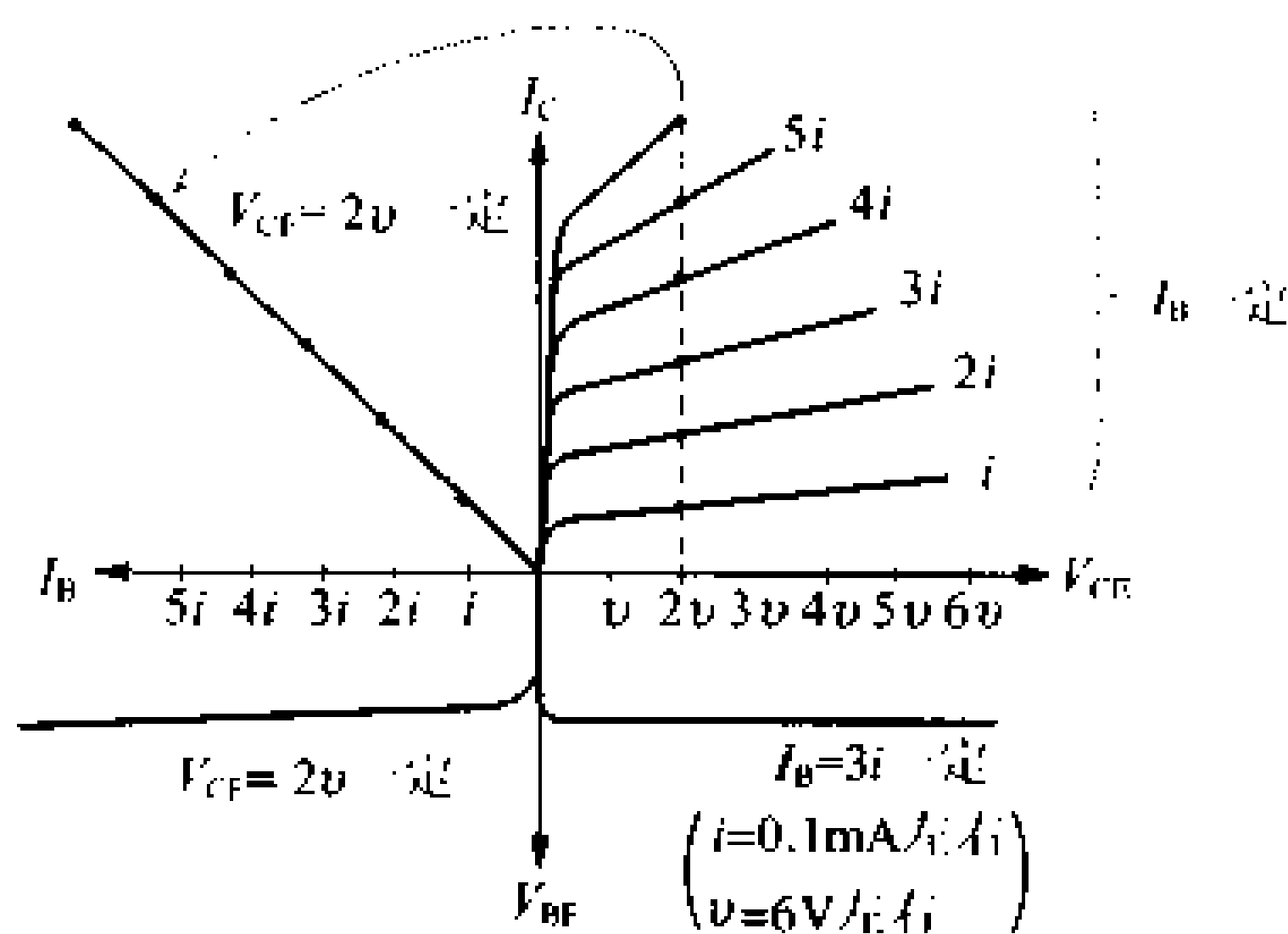


图 2.41 发射极接地的静态特性

集电极的断路  
电流

第一象限是输出特性。这个特性中,当输入端的基极电流  $I_b$  为零时,输出端的集电极电流  $I_c$  不等于零。这是由少数载流子所形成的电流,称其为集电极的断路电流。再在发射结上加上由集

电极电压  $V_C$  而形成的正向偏压时,于是它对载流子的注入造成了影响,所以特性曲线向右上方抬起。第二象限是电流传输特性。这个特性曲线在输出特性上,把集电极电压固定不变后,如能读出集电极电流  $I_C$  就可得到这一特性。

第三象限是输入特性。和二极管的正向特性基本上一样。因为这种特性几乎不受集电极电压的影响,所以可用一条曲线画出。第四象限是电压反馈特性。这个特性在输入特性上,将基极电流固定不变后,如能读出基极电压  $V_{BE}$  就可求得这一特性。

## □ 相关知识 ● 能够放大的原因

基极接地

将发射极作为输入端,集电极作为输出端、基极作为接地端的使用方式称为基极接地。在基极接地情况下,虽然不能进行电流放大,但能够进行电压放大。

流过发射极的电流恒等于基极电流和集电极电流之和。作为晶体管特性来说,令发射极电流的大小为 1,这时的集电极电流的大小用  $\alpha$  表示,称  $\alpha$  为基极接地的直流电流放大系数(图 2.42)。因为  $\alpha$  最大是 1,所以不能进行电流放大,但是能够放大电压。

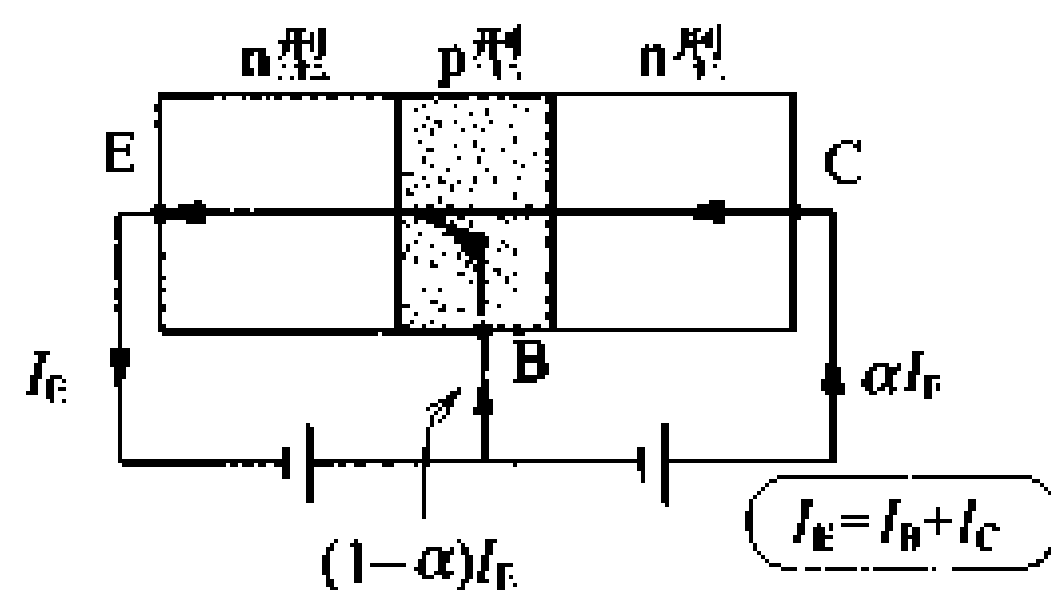


图 2.42 电流放大系数  $\alpha$

直流电流放大  
系数

因为在发射极和基极之间是正向偏压,所以输入电阻较小(约数百欧姆)。可是另一方面,因为集电极和基极之间是反向偏压,所以输出电阻较大(约  $1\text{M}\Omega$ )。因此,输出侧的负载可以使用大的电阻。之所以能够放大电压,这是由于输入电阻和输出电阻的大小不同的缘故。

例如:输入电阻为  $300\Omega$ ,与集电极相连接的负载电阻为  $30\text{k}\Omega$ ,令  $\alpha=0.99$ 。如果让发射极电流变化  $\Delta I_E$ ,那么发射极和基极之间的电压微小变化  $\Delta V_i$  和负载电阻上的电压微小变化  $\Delta V_o$  分别为

$$\Delta V_i = 300 \times \Delta I_E$$

$$\Delta V_o = 30000 \times 0.99 \times \Delta I_E$$

于是,电压增益就是

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = 99(\text{倍})$$

## 12 实际晶体管

**□ 要点** 让电流沿箭头方向流动那样加上偏压,而且必须不超过最大额定值。使用规格参数表来选择与用途相对应的晶体管。

**□ 解释** ● 晶体管的符号和型号

不同的晶体管按它的型号来区分。型号是以 JIS(日本工业标准)为基础来确定的。这些都在 EIAJ(日本电子机械工业会)进行了注册。不管 pnp 型还是 npn 型都按高频用和低频用来分类。可是实用当中高频用和低频用的区别并不明显。一般根据厂家推荐的用途来选用。

晶体管的符号如图 2.43 所示。这种符号可以说在最初制造的点接触型晶体管时,就符号化了。可是在电路图中并不注明 E、B、C 记号。带箭头的端子是发射极,偏压要按照让电流沿箭头方向流动那样来施加。

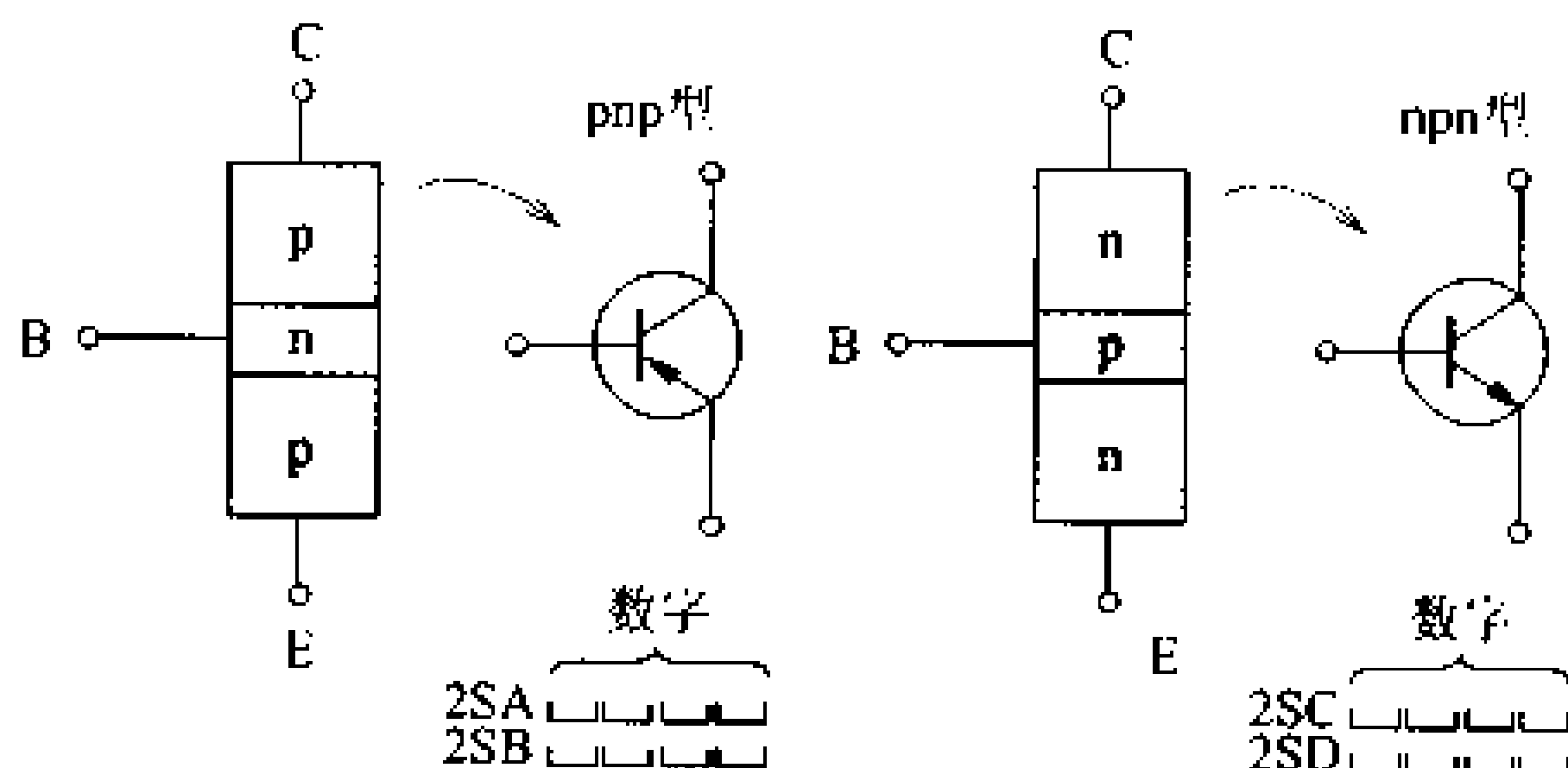


图 2.43 晶体管的图符号和型号

### ● 晶体管的外形图

图 2.44 给出了晶体管外形图例。外形图随品种的不同而不同。另外,即使是相同的外形名称,电极的连接也随厂家的不同而不同。实用当中,使用晶体管时,必须参照厂家的外形图来确认电极。

### ● 晶体管的最大额定值

为了维持晶体管特性和安全使用,首先要确定出最大的额定值。所谓的最大的额定值就是使用时一定不能超过电流、电压、功率和温度等最大允许值。电压的额定值是以击穿电压为参考来决

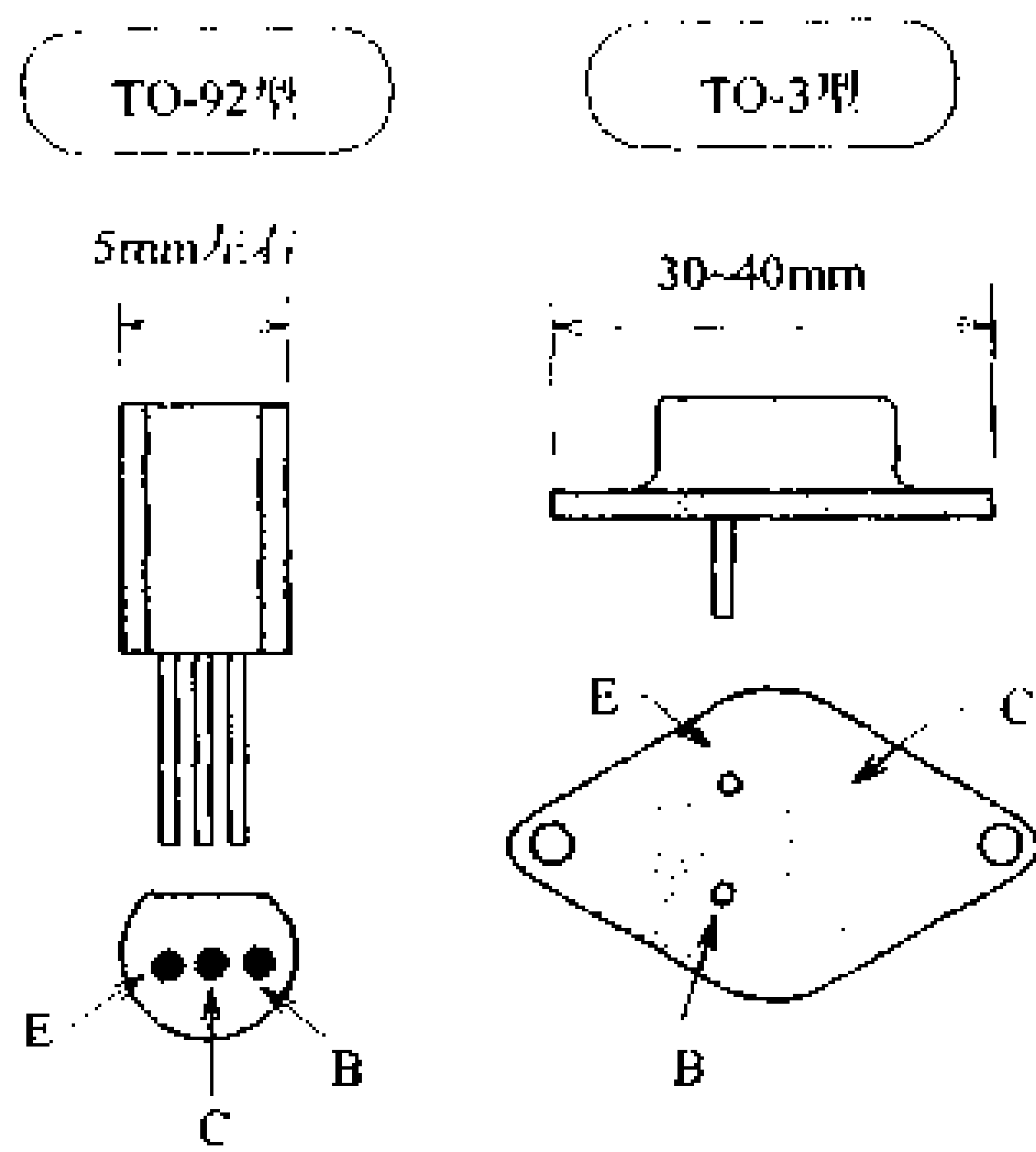


图 2.44 晶体管的外形图

集电极功率损耗

定的。电流的额定值是考虑 pn 结的温度和直流电流放大系数的变化等来决定。集电极电压和集电极电流之积  $P_c$  称作集电极功率损耗。最大额定值也由  $P_c$  来决定(图 2.45)。

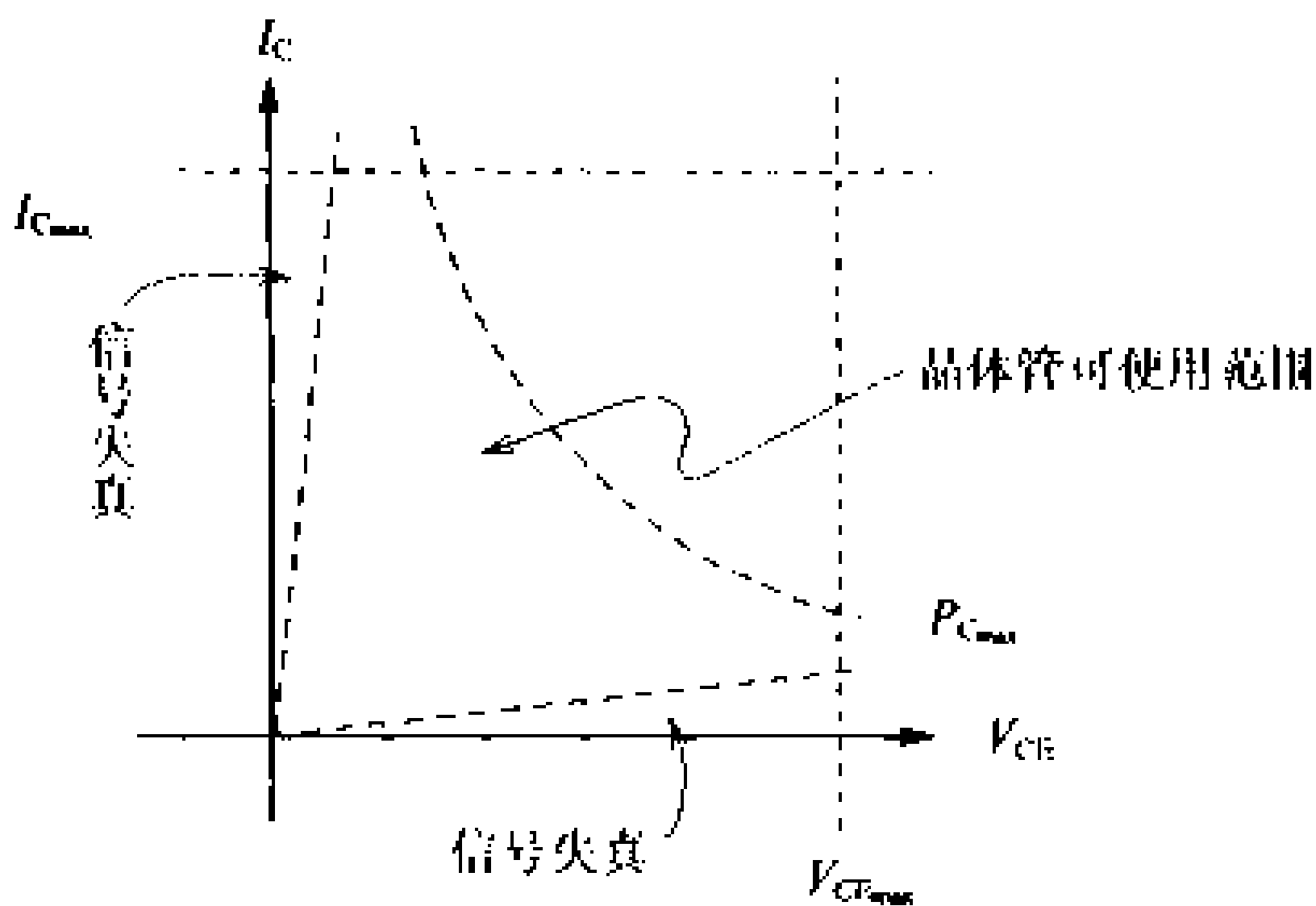


图 2.45 晶体管的可使用范围



## 13 FET 的结构

### □ 要 点

称场效应晶体管为 FET。FET 根据它的栅极结构大体上可分为 JFET、MOSFET 和 MESFET 三种。FET 是由栅极电压来控制漏极电流。

### □ 解 释 ● FET 的结构及其分类

漏极 源极  
栅极

场效应晶体管 FET 的电极有三个,分别为漏极,源极和栅极。FET 根据栅极的制作方法的的不同,大体上可分为三种:

FET { JFET(junction;结型 FET)  
MESFET(metal semiconductor FET)  
MOSFET(metal oxide semiconductor FET)

结型 FET 的栅极是由杂质半导体制成。MES 型 FET 的栅极是由金属制成。MOS 型 FET 的栅极是由硅氧化膜制成。硅氧化膜是由玻璃制的膜,是绝缘体。不管哪种情况都是根据加在栅极上的电压来控制沟道宽度(图 2.46)。

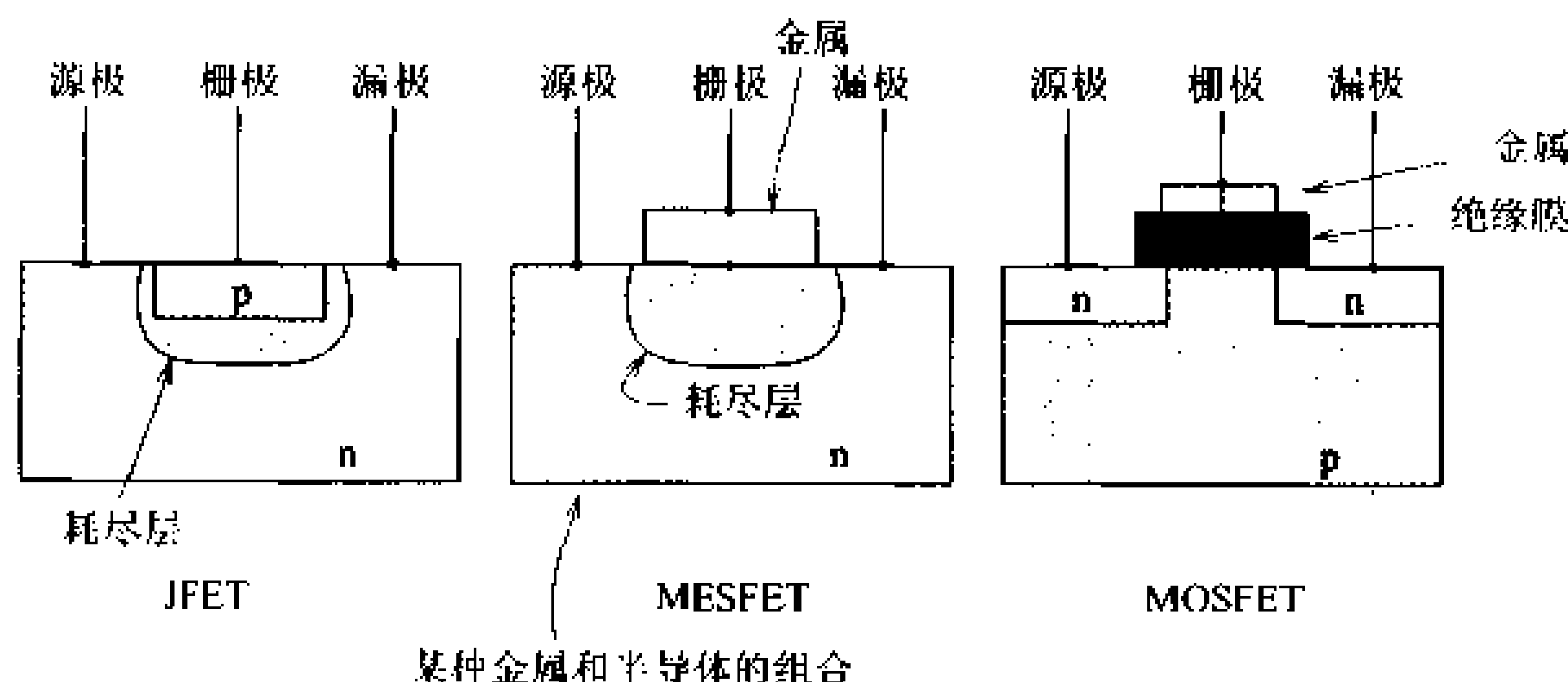


图 2.46 FET 的结构

双极型晶体管是由输入电流来控制输出电流的电流控制型晶体管。而场效应晶体管则是由输入电压来控制输出电流的电压控制型晶体管。因此,由于栅极没有电流,所以输入阻抗高。

### ● FET 的工作原理

因为 FET 是由空穴或自由电子中的一种载流子工作,所以称它为单极晶体管。与此相对应,普通晶体管是由空穴和自由电子

单极晶体管

沟道

增强型 耗尽型

两种载流子进行工作,故称其为双极晶体管。  
将载流子通道称作沟道。控制沟道宽度的是栅极。如果将载流子比作水,那么水源就是源极,调节阀就是栅极,排水沟就是漏极。假如用排水沟流动的水转动水车,那么栅极就与用调节阀控制水车转数相似(图 2.47)。沟道有增强型和耗尽型两种。

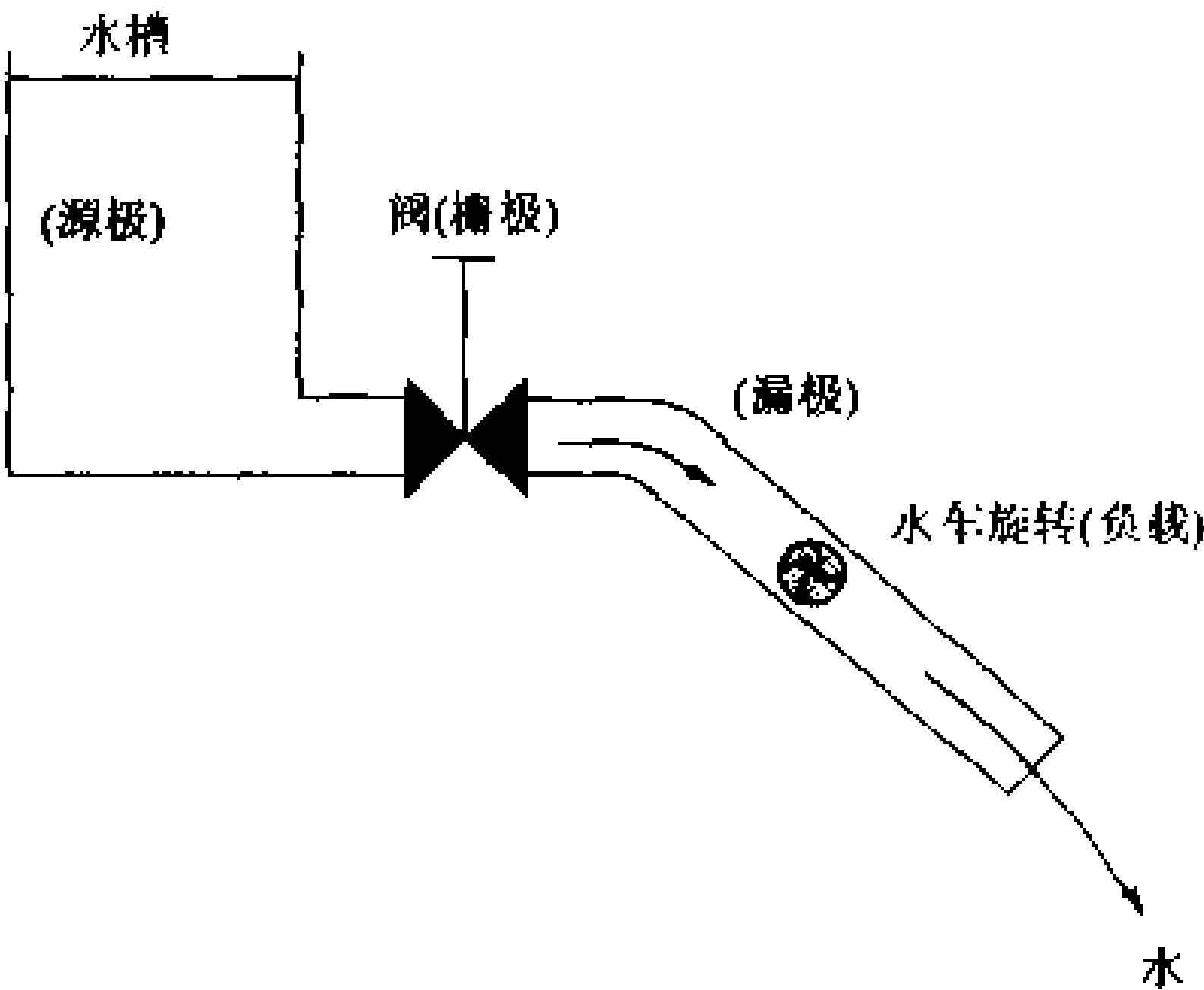


图 2.47 FET 的比喻

常闭型

常开型

增强型是由施加电压才能形成沟道。这时,如果栅极电压是 0,则漏极没有电流,所以也称常闭型 (normally off)。耗尽型是事先制好沟道。这时,即使栅极电压为 0、漏极也有电流,所以称为常开型。另外,当流过沟道的载流子是空穴时,称其为 p 沟道。是自由电子时,称其为 n 沟道。

- 沟道
- 增强型 (MOSFET)

耗尽型 { JFET  
MEFET  
MOSFET

## 14 结型 FET

**要 点** 结型 FEF 用 pn 结上产生的耗尽层来控制沟道, 并且是栅极电压控制漏极电流, 输入阻抗很高。

**解 释** ● 结型 FET 的栅极结构

结型 FET 的栅极是用 pn 结制成。n 型沟道时, 在 n 型半导体两端设置漏极和源极, 在中间制成 p 型半导体, 并把它作为栅极。在栅极施加反向偏压, 能使 pn 结面上的耗尽层变宽或变窄, 从而控制载流子的移动(如图 2.48)。如果不断地增高反向电压, 这时由于耗尽层的扩宽而使沟道不断变窄, 最后完全变得塞住。将完全塞住的沟道, 载流子变成不能流动的状态称作夹断(pinch off)。而这时加在栅极的电压称作夹断电压。

夹断电压

图 2.49 给出了结型 FET 的符号

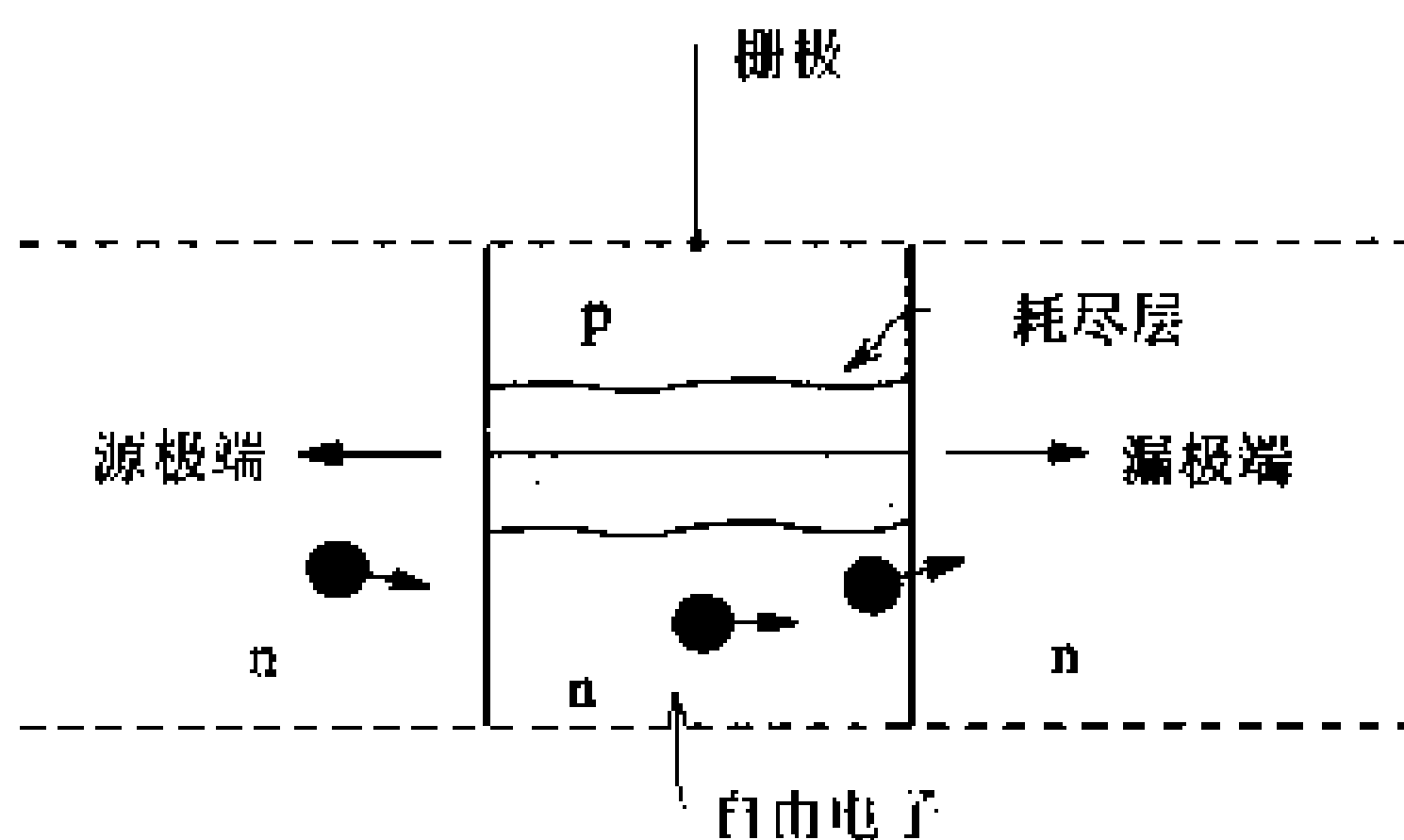


图 2.48 栅极结构的模型图

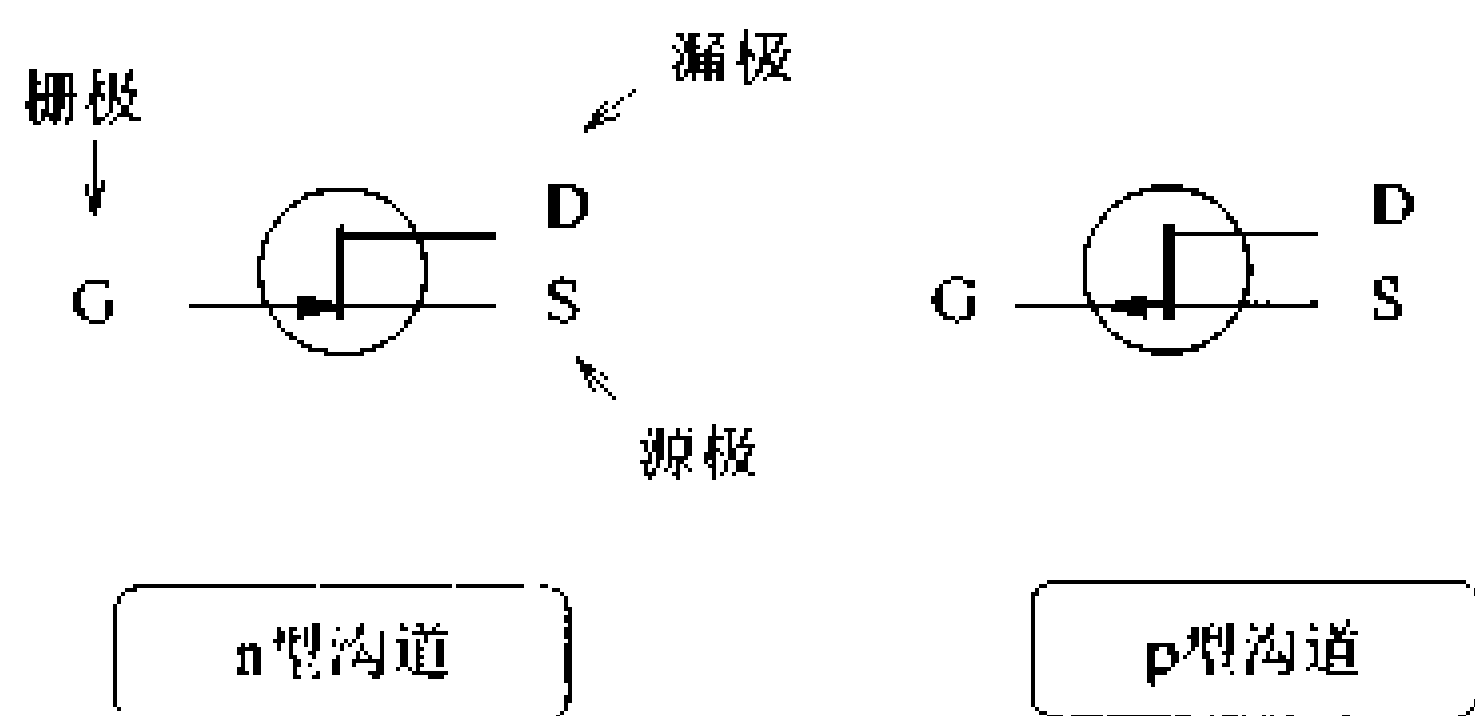


图 2.49 结型 FET 的符号

● FET 的静态特性

第一象限是输出特性。漏极电流几乎不依靠漏极和源极间的电压。尽管漏极和源极之间的电压一定,如果栅极电压变化,那么因为漏极电流也变化,所以输出特性曲线可用多条曲线描绘。

第二象限相当于双极晶体管的电流传输特性。横轴是栅极电压,纵轴是漏极电流。因为这个特性曲线是漏极与栅极之间的电压一定,所以漏电流和双极型晶体管时一样,可从输出特性曲线求得。在 FET 的传输特性中漏极电流是与栅极电压的平方成正比 (图 2.50、图 2.51)

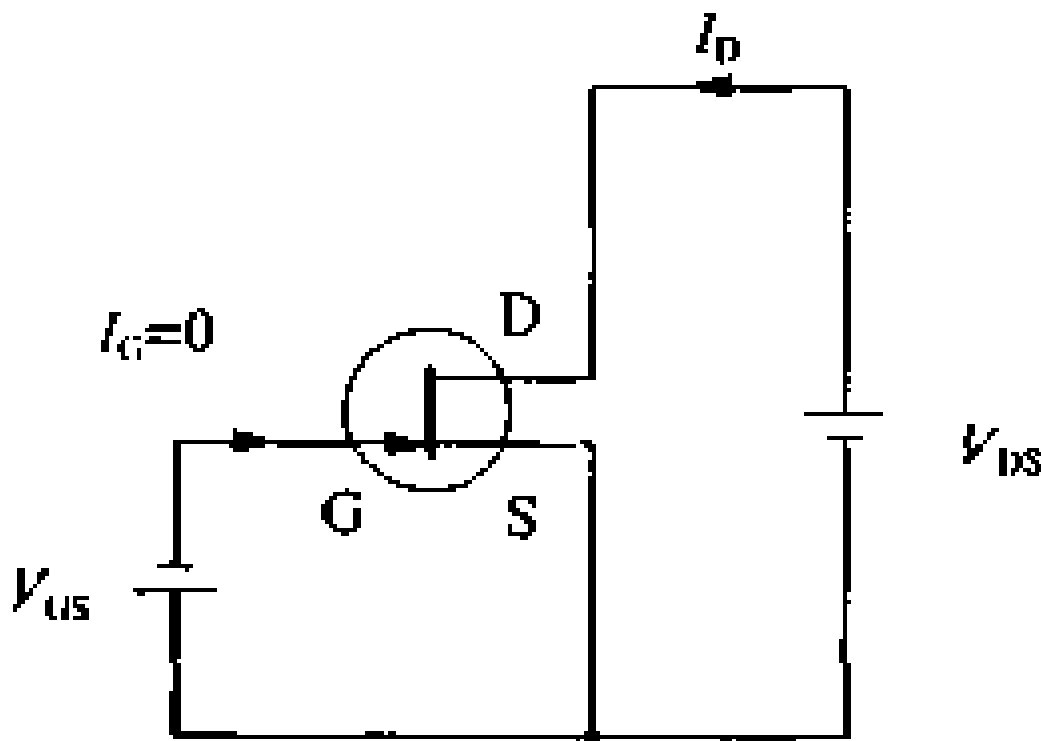


图 2.50 结型 FET 的电路图

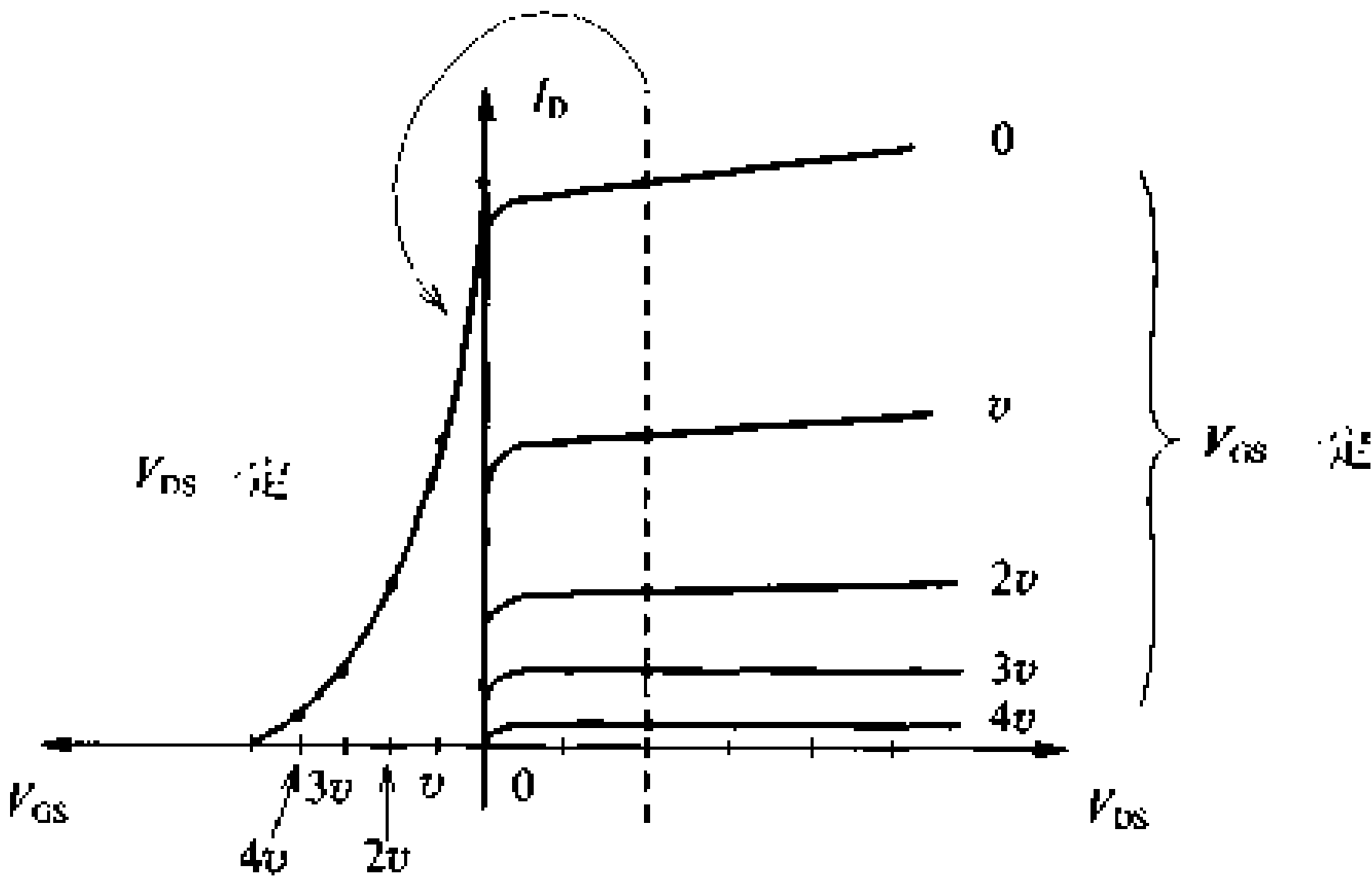


图 2.51 结型 FET 的静态特性

# 15 MOS 型 FET

**要 点** MOS 型 FET 是利用绝缘体的介质极化来控制沟道。栅极是金属和绝缘体以及半导体的三层结构。它有增强型和耗尽型两种。

**解 释** ● 增强型 MOS FET 的栅极结构

增强型 FET

MOS 型 FET 的栅极结构是在由玻璃( $\text{SiO}_2$ )制成的绝缘膜上装上电极。增强型 FET 是通过加栅极电压才能形成沟道。栅极不加电压时, pn 结上有电位势垒, 所以没有漏极电流。

反转层

如果如图 2.52 那样加栅极电压, 由于绝缘体引起了介质极化, p 型半导体的空穴被推向电极的负侧, 而少数载流子的自由电子向电极正端移动。其结果, 在紧靠绝缘体的下面产生了把 p 型反转成 n 型的区域。称这个区域为反转层。增强型情况下, 反转层成了沟道且有漏极电流流过(图 2.52)。MOS 型 FET 的漏极电流表现出与栅极和源极之间的电压平方成比例的特性。将出现反转层且将开始出现漏极电流的电压  $V_T$  称为**阈值电压**(或**阈电压**)(图 2.53)。

阈值电压

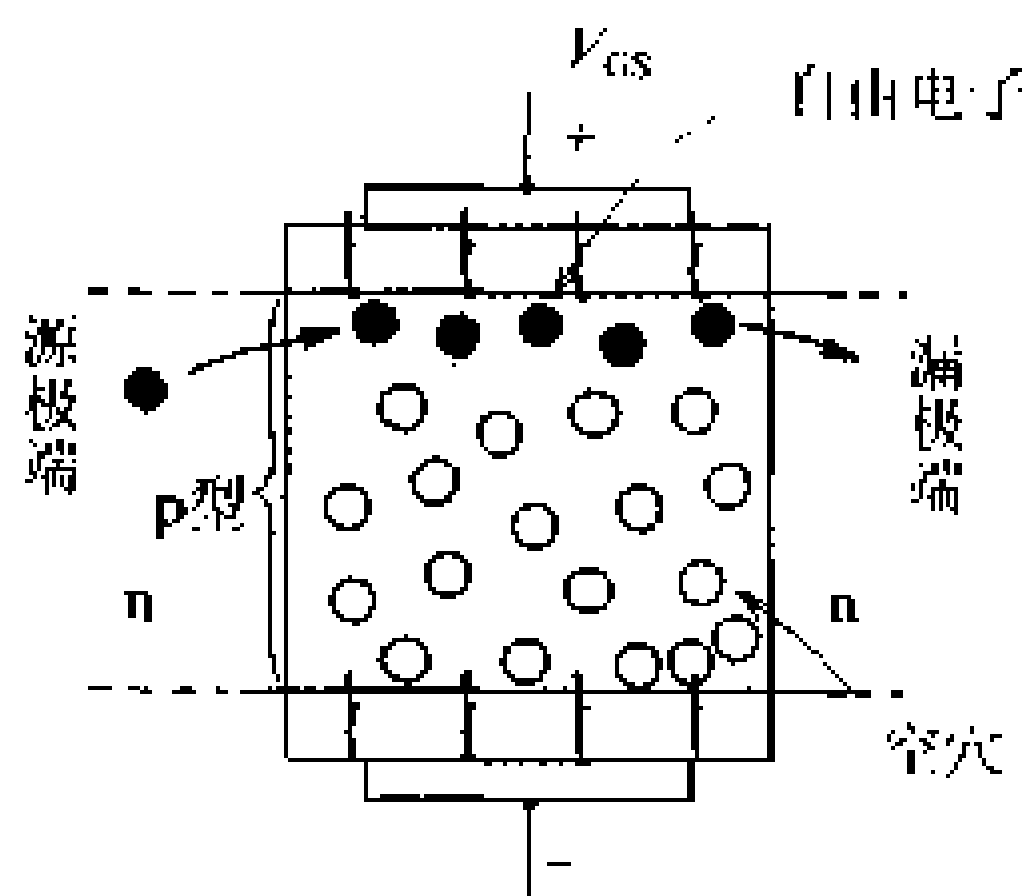


图 2.52 栅极结构的模型图

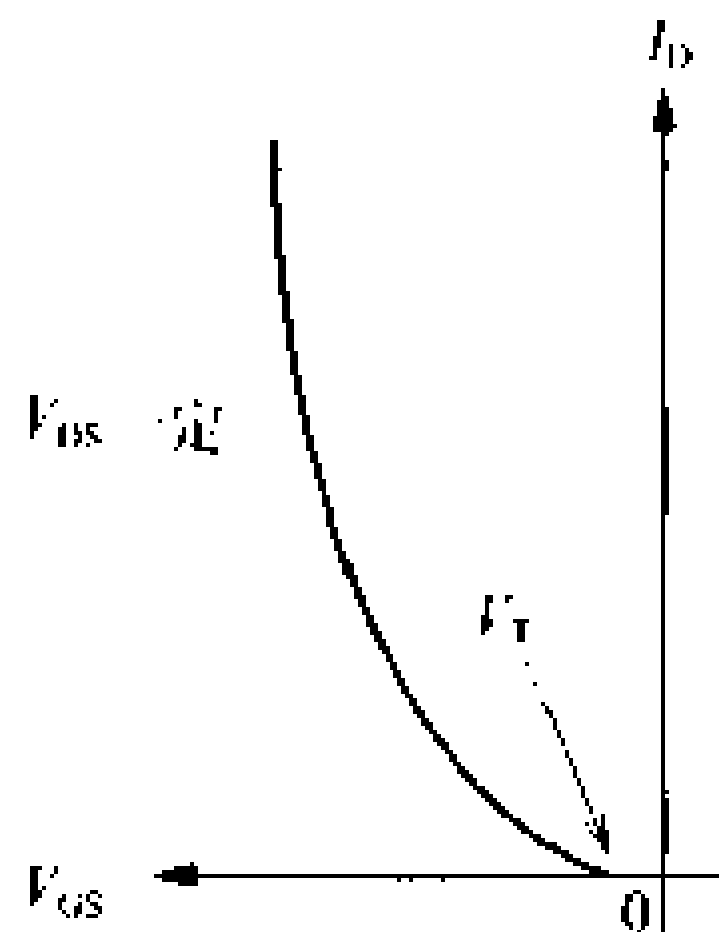


图 2.53 传输特性

● 耗尽型 MOS FET 的栅极结构

耗尽型 MOS FET 的栅极结构也和增强型的很相似。不同的地方是相当于反转层的沟道是事先制作好的。这个沟道和二极管的 pn 结相同。如果在二极管上一加反向偏压, 那么这正好和扩展耗尽层一样是用栅极电压来扩展沟道或压缩沟道(图 2.54)。

耗尽型 MOS FET 也表现出漏极电流与栅极电压平方成比例的特性(图 2.55)。

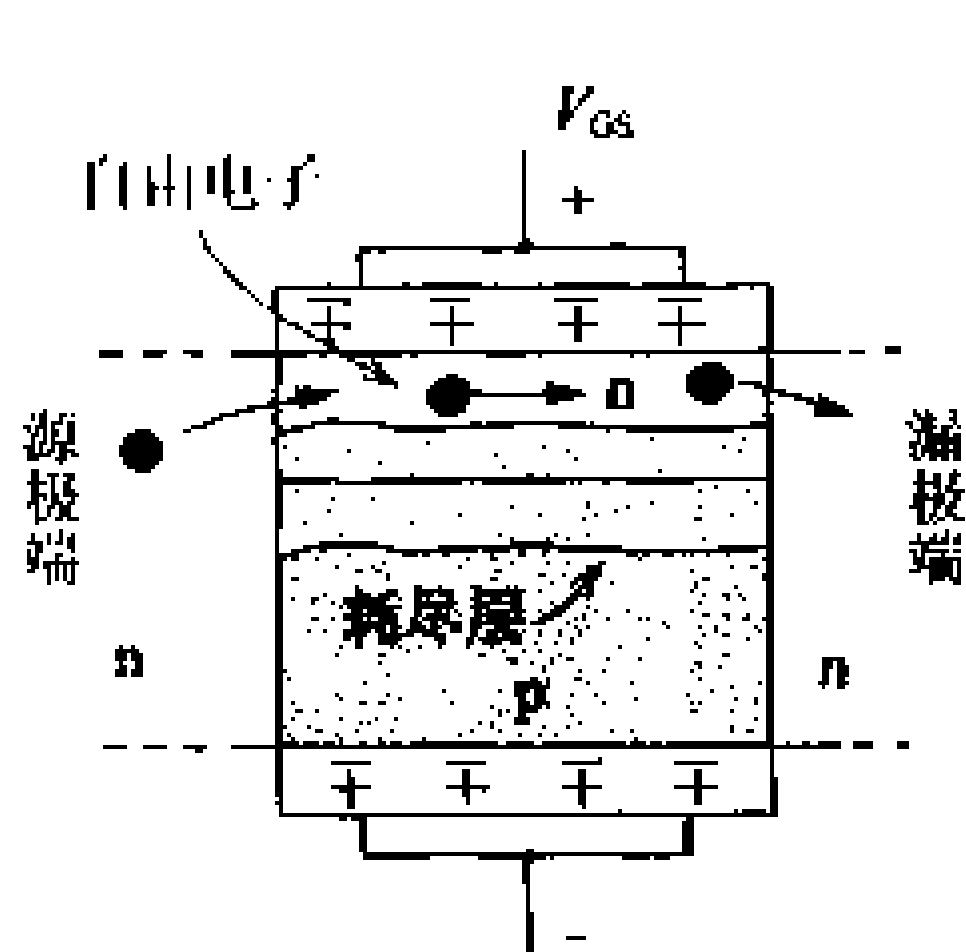


图 2.54 栅极结构的模型图

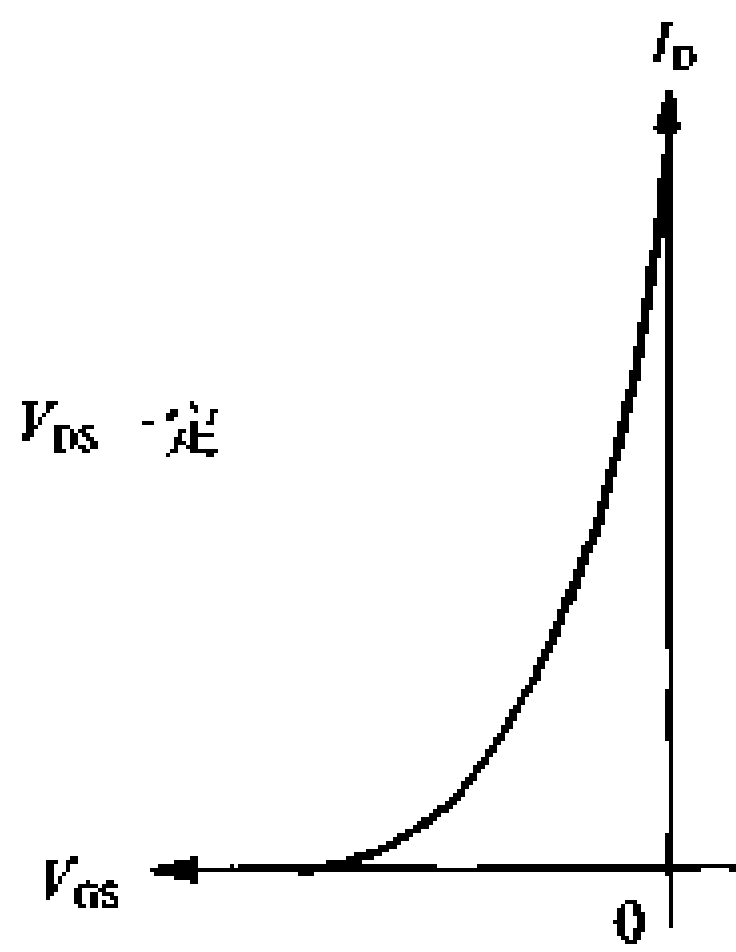


图 2.55 传输特性

● MOS FET 的符号

表 2.1 给出了 MOS FET 的符号。附有箭头的栅极端子  $G_2$ ，通常与源极相连接使用。n 型时箭头向内侧，p 型时是箭头向外侧。

表 2.1 MOS FET 的符号

	n 沟道	p 沟道
增强型		
耗尽型		

## 16 集成电路

### □ 要点

将芯片上具有超小型的电子电路称为集成电路。称芯片上的电路元器件数为集成度,芯片的大小约是几毫米。集成电路有双极型和 MOS 型两种。

### □ 解释 ● 集成电路的结构

如果使用投影仪就能将幻灯片的图像放大,反过来,如果使用照像技术,也能将胶片上的图像缩小。在集成电路制造中也采用这种照像技术把很多电路元器件缩入在约 5mm 见方的半导体芯片上。这并不是单纯地对电路图进行投影,而是要经过多道工艺制造出电路元器件,以及进行配线等。电路元器件是以晶体管和场效应晶体管为主体,再使用二极管、电阻器和电容器等。

IC

增强型 IC

MOS 型 IC

集成电路也叫 IC(integrated circuit)。把以增强型晶体管为主体,而组装起来的电路称为增强型 IC。把以 MOS 型 FET 为主体的称为 MOS 型 IC。图 2.56 给出了增强型 IC 的断面结构模型。

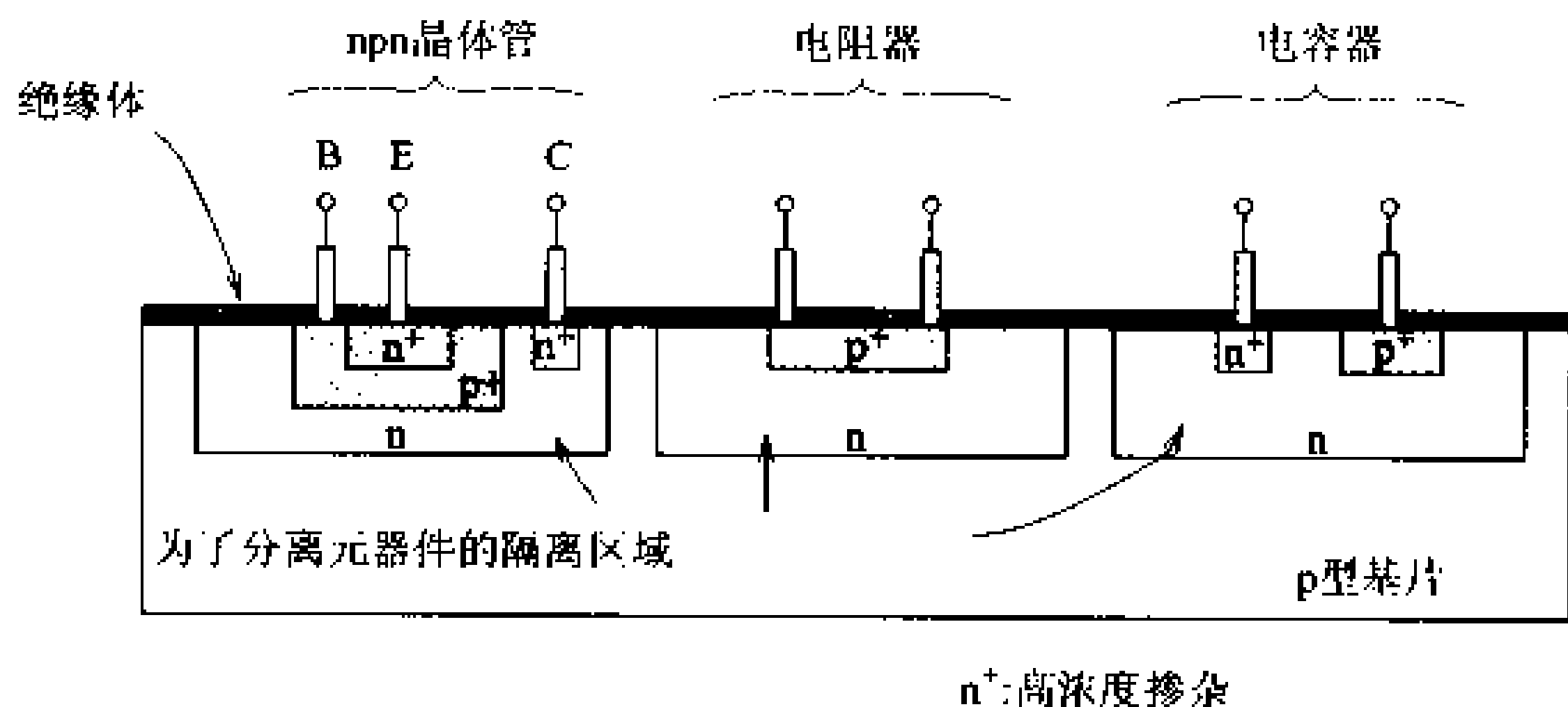


图 2.56 增强型 IC 断面图

### ● 集成电路的分类

集成电路根据应用的不同可分类成很多类型。现在我们分别从功能和结构角度上来看看它的分类。

从功能角度上看,集成电路可分类为

- 通用和特定的;
- 逻辑元件、记忆元件和微处理器;
- 模拟 IC 和数字 IC。

从结构上看,集成电路可分为

- 单片 IC 和混合 IC;
- 增强型 IC 和 MOS 型 IC;
- 单质和化合物的。

● IC 的集成度

集成度

集成电路元器件的 IC 基片称为芯片。将一块芯片上所制成的电路元器件数称作集成度。各个晶体管、电阻器、电容器等电路元器件所占面积并不相同。集成度最方便的是像表 2.2 那样进行分类。例如 64 千比特的动态存储器 DRAM 它约由  $16 \times 10^5$  个元器件组成,并命名为 LSI。4 兆比特的 DRAM,约由  $8 \times 10^6$  个元器件组成,并命名为 VLSI。

表 2.2 由集成度进行的分类

IC	元器件数	IC	元器件数
SSI(small scale IC)	$\sim 10^2$	VLSI(very large scale IC)	$10^5 \sim 10^7$
MSI(medium scale IC)	$10^2 \sim 10^3$	ULSI(ultra large scale IC)	$10^7 \sim$
LSI(large scale IC)	$10^3 \sim 10^5$		

● 集成度和发热量

现在看一下集成度增加时,发热量是如何变化的。假定有一个在一块芯片上用 4 个元件制成的集成电路。如果元件的一边长度变为原长度的 1/2,那么这时这块芯片上可容纳的元件数就是原来的 4 倍。如果元件的一边长度是原来的 1/4,那么,这块芯片上的元件数就是原来的 16 倍。也就是说,元件的一边长度每减少 1/2,集成度就增加 4 倍(图 2.57)。假定流过每 1 个元件的电流  $I$

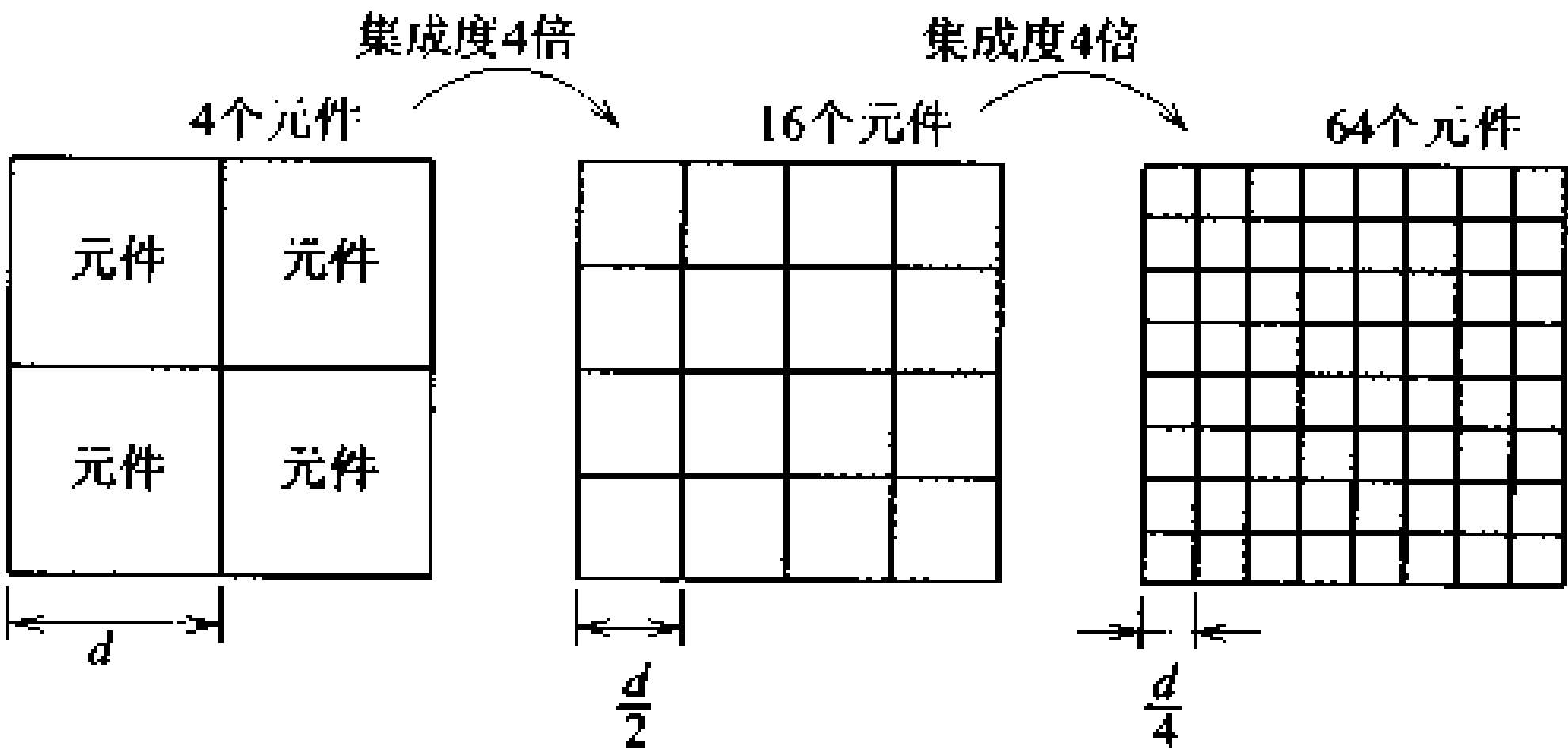


图 2.57 芯片的大小与集成度



不变和电阻  $R$  也不变,于是每块芯片的发热量应是与芯片上的元件数成正比。因为半导体的工作温度有上限,所以,实际的集成电路如何减少元件的发热量就成为一个大的课题。

● 增强型晶体管和 MOS FET 的比较

集成度  
消耗功率  
工作速度

如果将增强型晶体管和 MOS FET 的集成度、消耗功率和工作速度加以比较就得到表 2.3。工作速度取决于载流子迁移率的大小。如果载流子迁移率大,那么,工作速度也高。所谓工作速度,它是表示输出信号对输入信号响应的快慢。因为增强型晶体管比 FET 能让更多电流流过,所以工作速度快。

表 2.3 增强型和 MOS 型的比较

	集成度	消耗功率	工作速度
增强型 IC	小	大	大
MOS 型 IC	大	小	小

□ 相关知识 ● 关于 ASIC

ASIC  
PLA

通常把基本电路中利用率高的电路作为通用 IC 进行生产。通用 IC 以大多数非特定用户为对象。与此相反,将满足特定用途和按用户订货要求进行生产的 IC 称为 ASIC(application specific IC)。在 ASIC 中有一种被叫作 PLA(programable logic array)的定做(custom)的 LSI。PLA 是把芯片上事先排列好的逻辑元件(逻辑积,逻辑和)再由用户自己配线来实现电路功能的。配线是用程序来表达逻辑公式,并在专用写入器上进行。

# 17 数字 IC 和模拟 IC

要 点

按照 IC 所处理信号的形态,IC 可分为数字型的和模拟型两类。数字型的是利用晶体管的开关作用。模拟型的是利用晶体管的放大作用。

解 释

● 数字 IC

数字信号的处理是由逻辑电路来进行。可用晶体管和二极管来组成逻辑电路,这是因为晶体管和二极管能以开关形式进行工作。所有的逻辑电路都可以用“非”门、“或”(逻辑和)门以及“与”(逻辑积)门这三种基本电路来组成。如果从构造角度来看,数字 IC 也可像如下那样分为增强型和 MOS 型两类(表 2.4)。

表 2.4 数字 IC 的分类

增强型	DTL,TTL,ECL,F <sup>2</sup> L 等逻辑元件
MOS 型	pMOS,nMOS,CMOS 组成的记忆元件和逻辑元件

MOS 型中,特别是 CMOS(complimentary MOS)是由 pMOS 和 nMOS 组合成的逻辑元件。因消耗功率极小,适合高集成化。

TTL

TTL(transistor transistor logic)是经常使用的增强型逻辑元件,它以 DTL(diode transistor logic)为原形。图 2.58 给出了以 TTL 为例,型号名为 SN7400 的数字 IC。

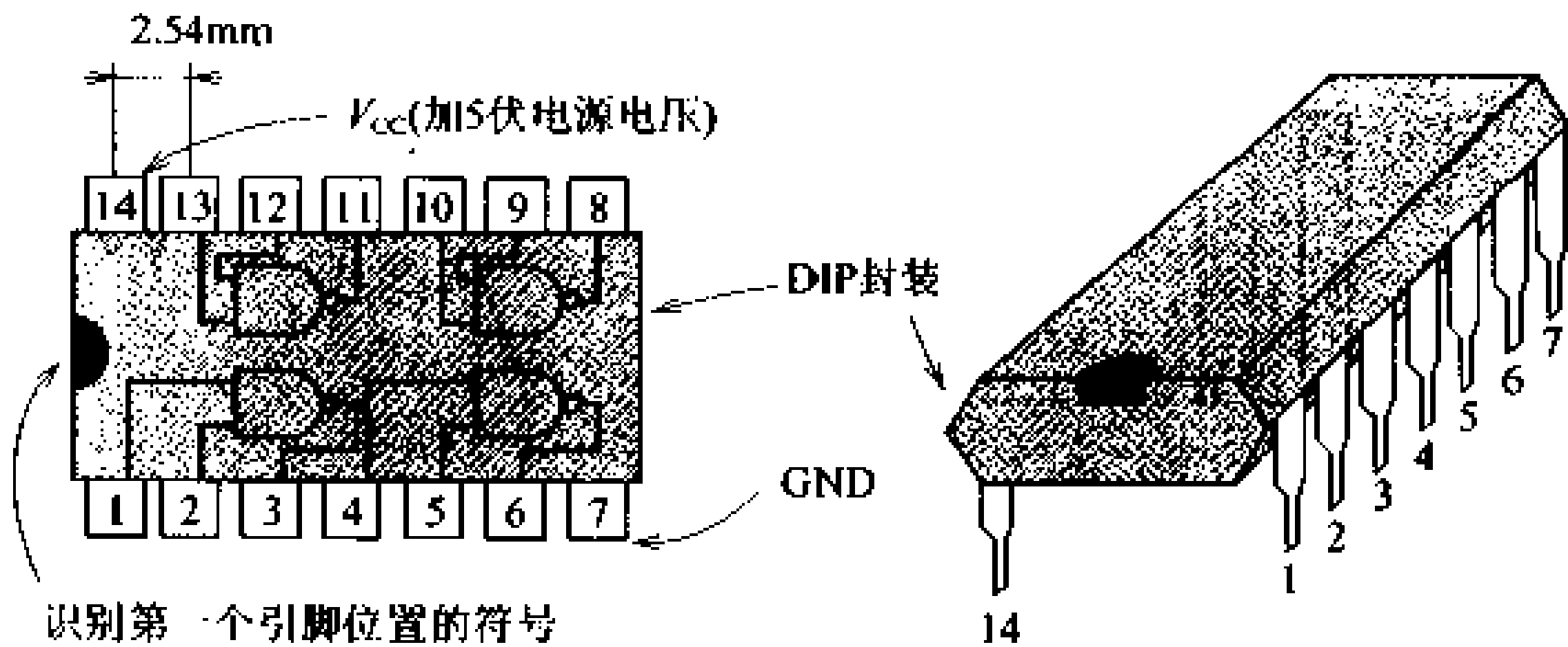


图 2.58 TTL 集成电路例

## ● 模拟 IC

### 运算放大器 OP 放大器

模拟信号的处理是由晶体管的放大作用来进行的。作为放大器的集成电路来说,有以差动放大器为主体的运算放大器(叫 OP 放大器或叫运算放大器)。运算放大器是以理想放大器为目标进行设计的。理想放大器要满足以下四个条件:

- ① 放大系数无限大;
- ② 输入阻抗无限大;
- ③ 输出阻抗无限小;
- ④ 能够放大的频率范围无限大。

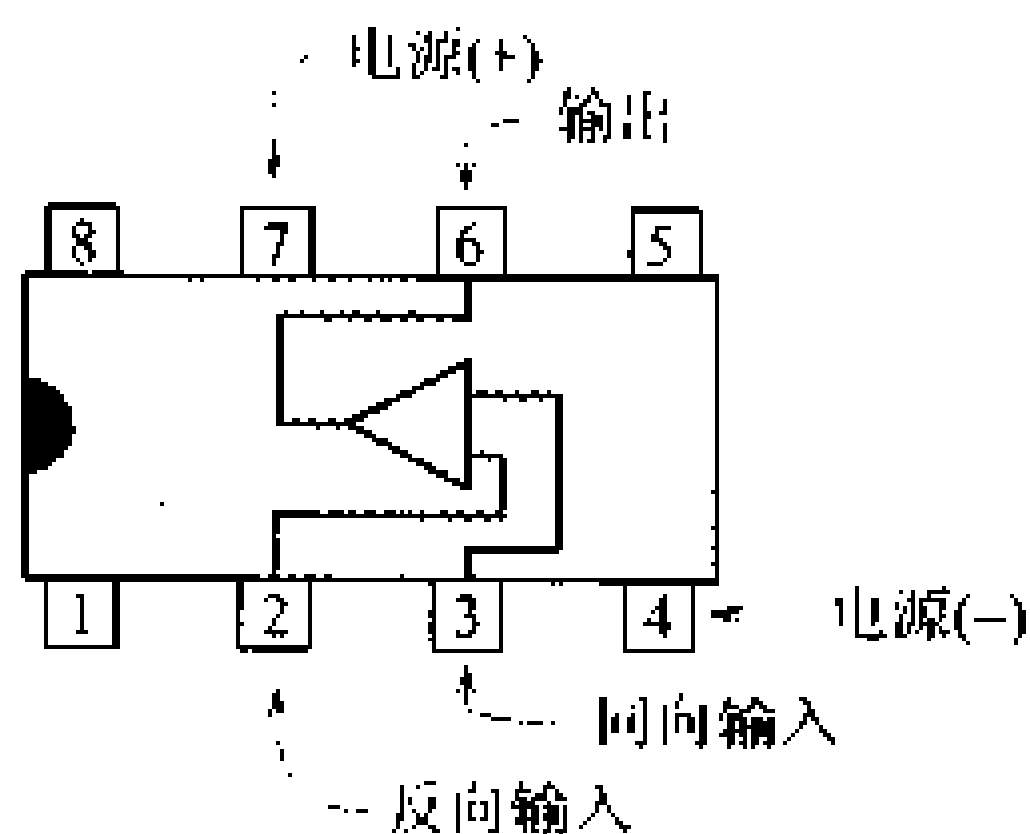


图 2.59 运算放大器例

图 2.59 是运算放大器  $\mu A741$  IC 的原型结构。型号的起名方法随厂家的不同而不同。不过电路 741 是其它厂家后来生产的同种产品,几乎都与最初的相同。

## □ 相关知识 ● 原始型和后续型

### 原始型

将某厂家最初开发并公布的新产品称作原始型(original source)。将以原始型为基础,由其它厂家生产并公布的同样产品称作后续型(second source)。后续型中有引脚相同的和引脚不同的两种形式。

### 后续型

## ● 数字信号和模拟信号

见图 2.60

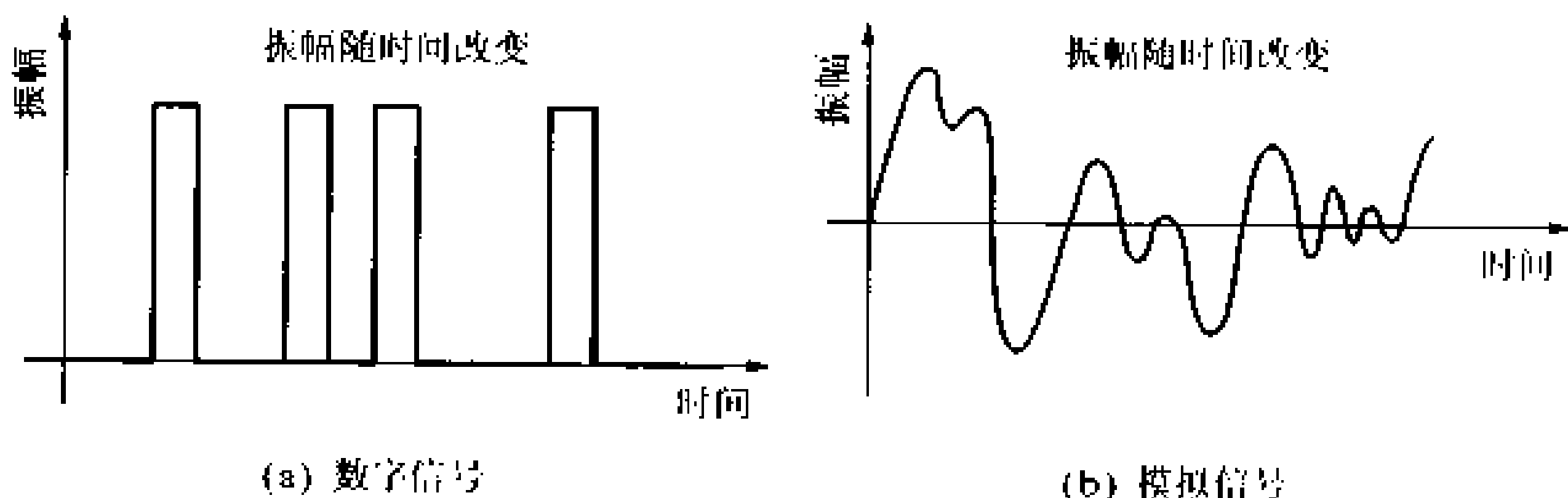


图 2.60 数字信号和模拟信号

# 18 记忆元件

□ 要 点

记忆元件可以记忆数字化的信息。RAM(random access memory)可以写入与读出。ROM(read only memory)是读出专用。

□ 解 释

● 记忆元件的结构和工作原理

记忆元件是把记忆单元按阵列集中起来构成的(图 2.61)。

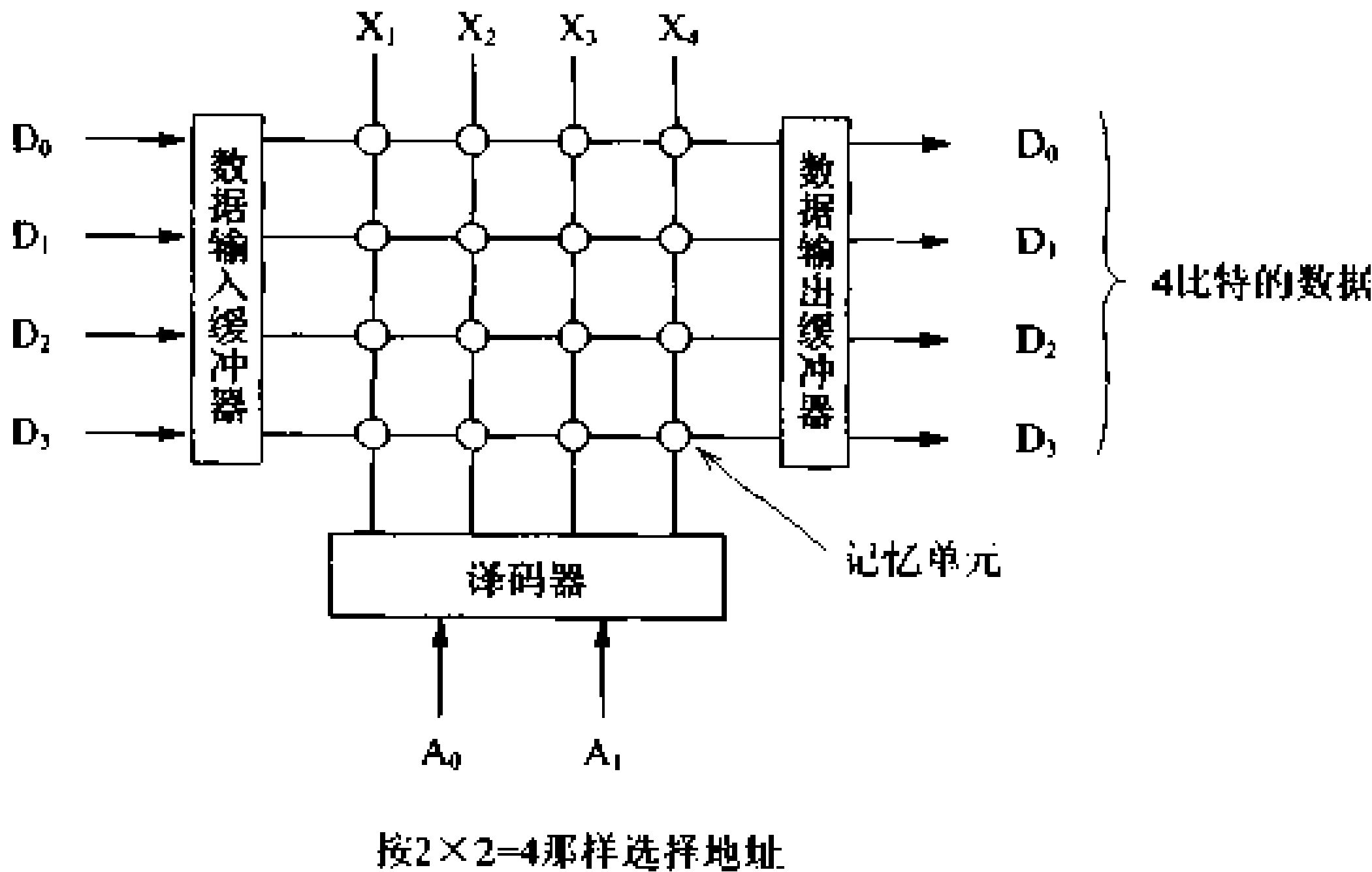


图 2.61 记忆元件的基本结构

译码器 寻址

一个记忆单元仅能记忆 1 比特的信息,它排列在阵列里。并给它一个地址番号,然后再通过译码器(decoder)对其进行寻址(adress)。

存取  
存取时间

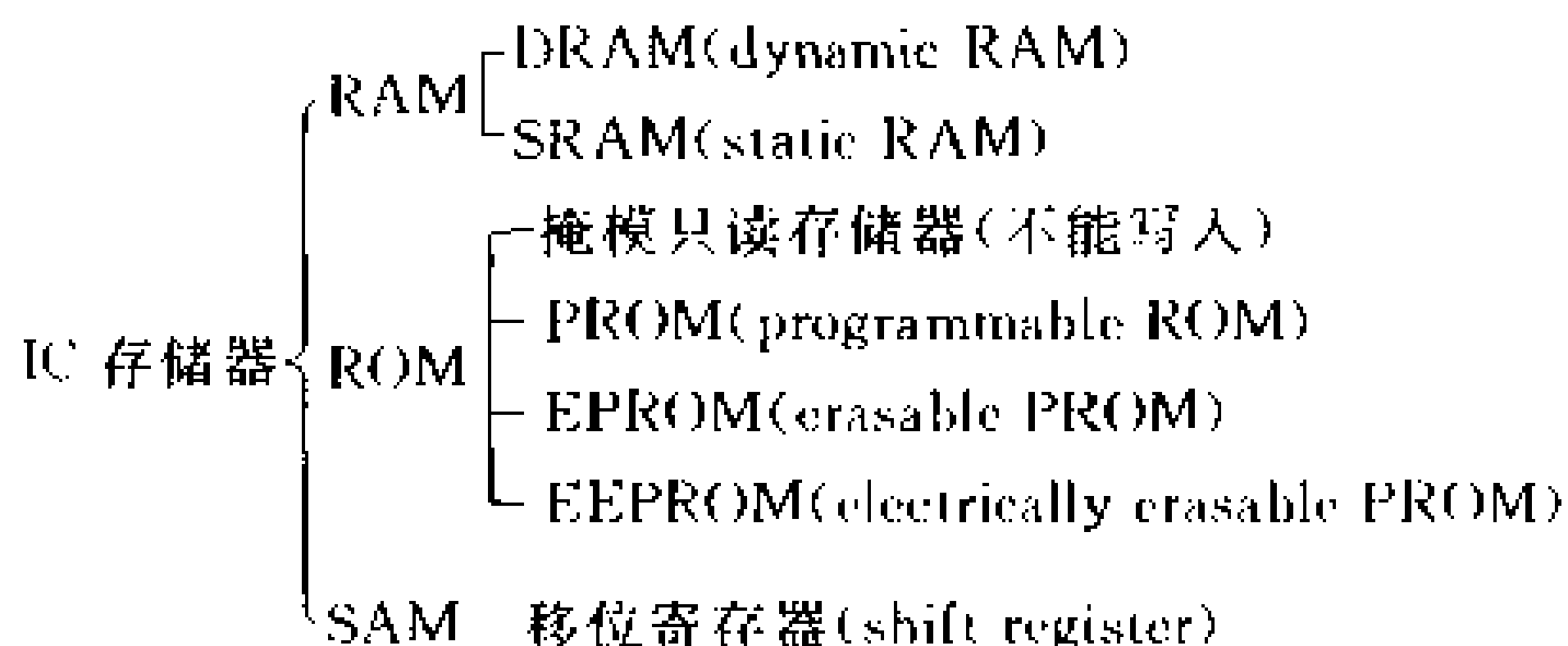
被选中的记忆单元按来自中央处理器(CPU)的信号进行数据的写入或读出。CPU 向记忆装置写入数据或从记忆装置读出数据称为存取。将从 CPU 发出存取信号开始到读出记忆数据为止的时间称作存取时间(access time)。

● 记忆元件的分类

IC 存储器  
RAM ROM

半导体记忆元件也叫 IC 存储器。IC 存储器如果从功能上来区分,可分为三类。RAM 能够读出和写入数据;ROM 仅能读出。不过,在将其装到电路中之前,可有条件的写入数据。为了写入要

使用被叫作 ROM 写入器的专用装置。如果给 RAM 或 ROM 都指定一个地址,那么,不管哪个地址,存取的时间都是相同的。另一方面,SAM(serial access memory)可按写入的顺序读取数据。



### ● DRAM 的存储单元

作为记忆元件例子,这里举出 DRAM。DRAM 的结构简单,而且一个存储单元能用一个 MOSFET 和一个电容器组成。MOSFET 是用开关动作来对所选中的电容器进行一会充电,一会放电(图 2.62)。根据电容器是否储存有电荷来决定 1 比特的信息量。

储存在电容器里的电荷,会一点一点自然漏掉,因此,DRAM 情况下,每次读出记忆内容后都必须进行新的充电。将这一工作叫作再生(refresh)。再生就是重新写入的意思。

再生

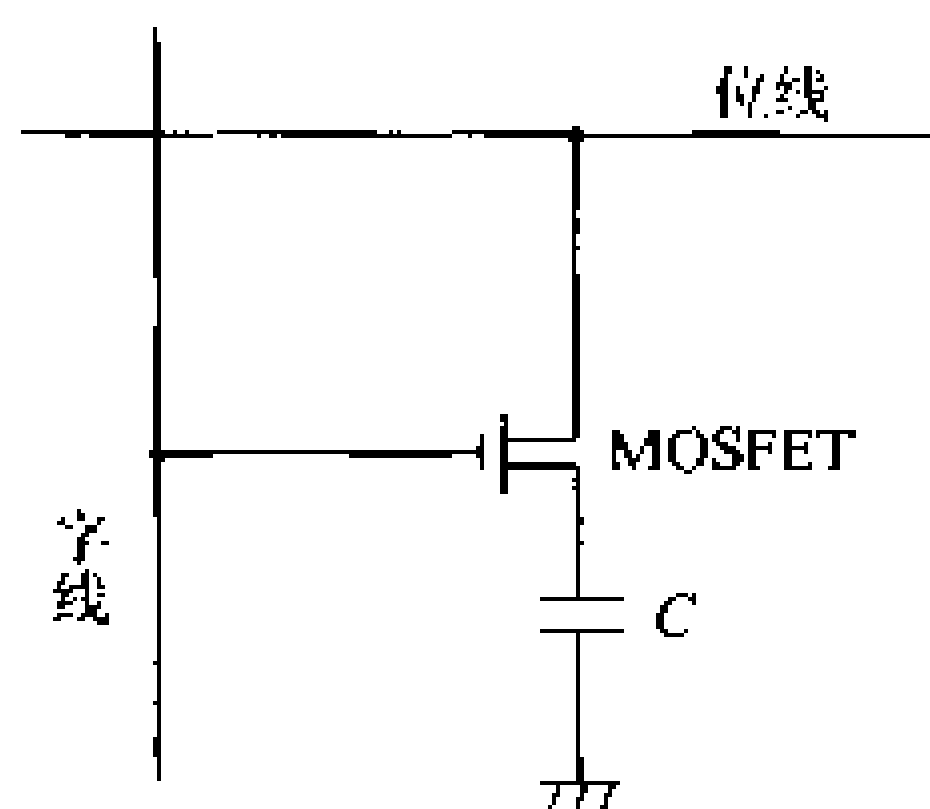


图 2.62 DRAM 的存储单元

# 19 半导体激光器

□ 要 点

作为相干发光元件有半导体激光器。半导体激光器是一个光的振荡电路。振荡机理的关键是受激光的放大和由反射镜实现的正反馈。

□ 解 释

● 半导体激光器的结构

半导体激光器

异质结

激活区域

化合物半导体的砷化钾(GaAs)具有把过剩的能量以光的形式放出的特性。图 2.63 是作为光通信的光源而实用化的半导体激光器(或激光二极管)的原理结构。如图所示,它用 p 型和 n 型半导体夹住本征半导体 GaAs。p 型和 n 型是用 AlGaAs 制成。称这种种类不同的半导体之间的结为异质结。如果有两个异质结就称双异质结。双异质结是为了把载流子复合时发出的光封入本征半导体区域内而进行开发的。因为在这个本征半导体中既发光又放大,故称此区域为激活区域。激活区域的两端,一端为镜面,另一端为可透过一部分光的半镜面。

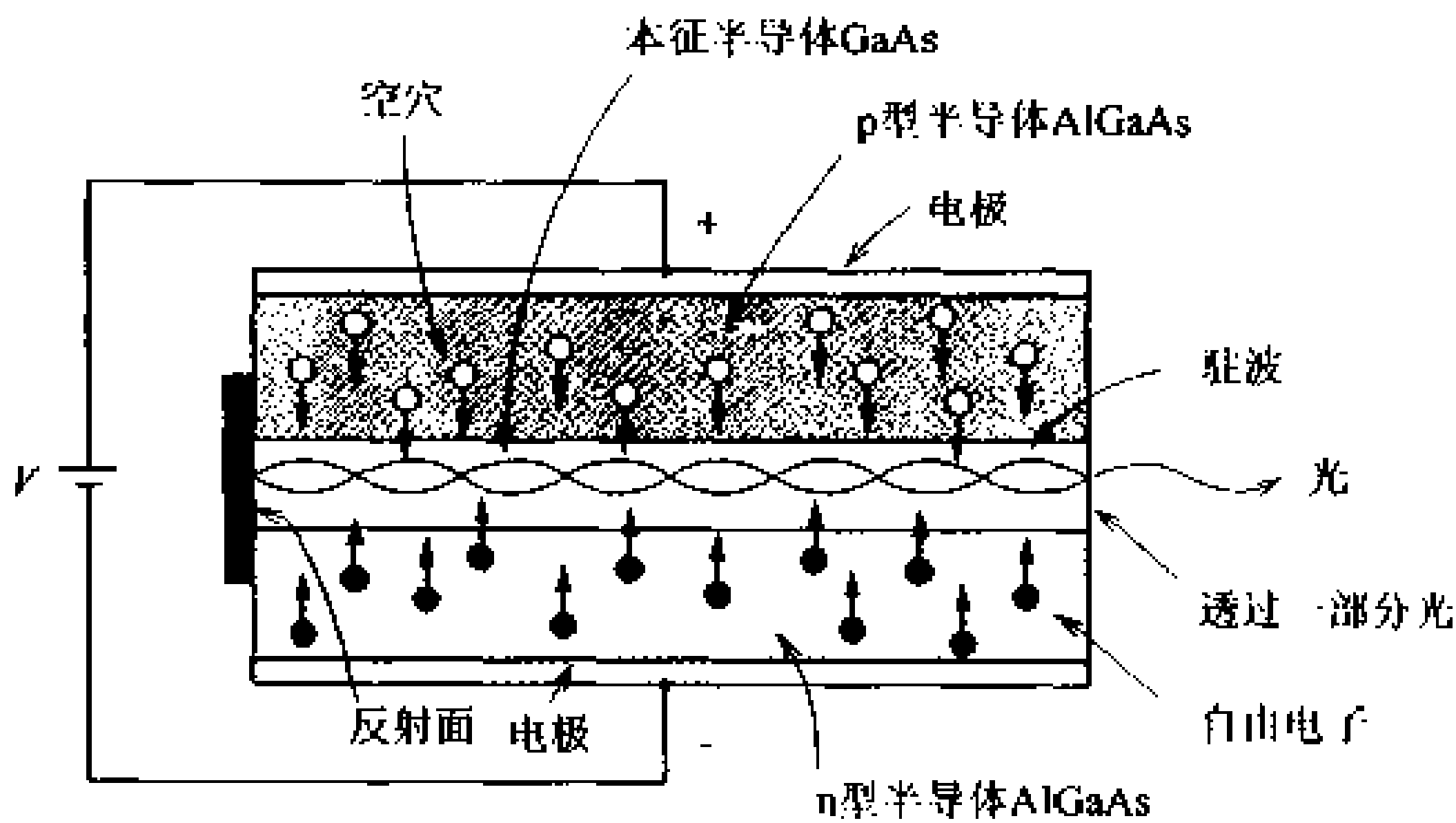


图 2.63 半导体激光器的结构

● 能带结构

如果在半导体激光器上加一正向偏压,那么,n 型半导体的费米能级比 p 型的相对上升了。其结果是自由电子和空穴向激活区注入。注入的载流子在激活区内由于再复合而发光(图 2.64),从而造成半导体激光器的双异质结处激活区的折射率比相邻的 p 型

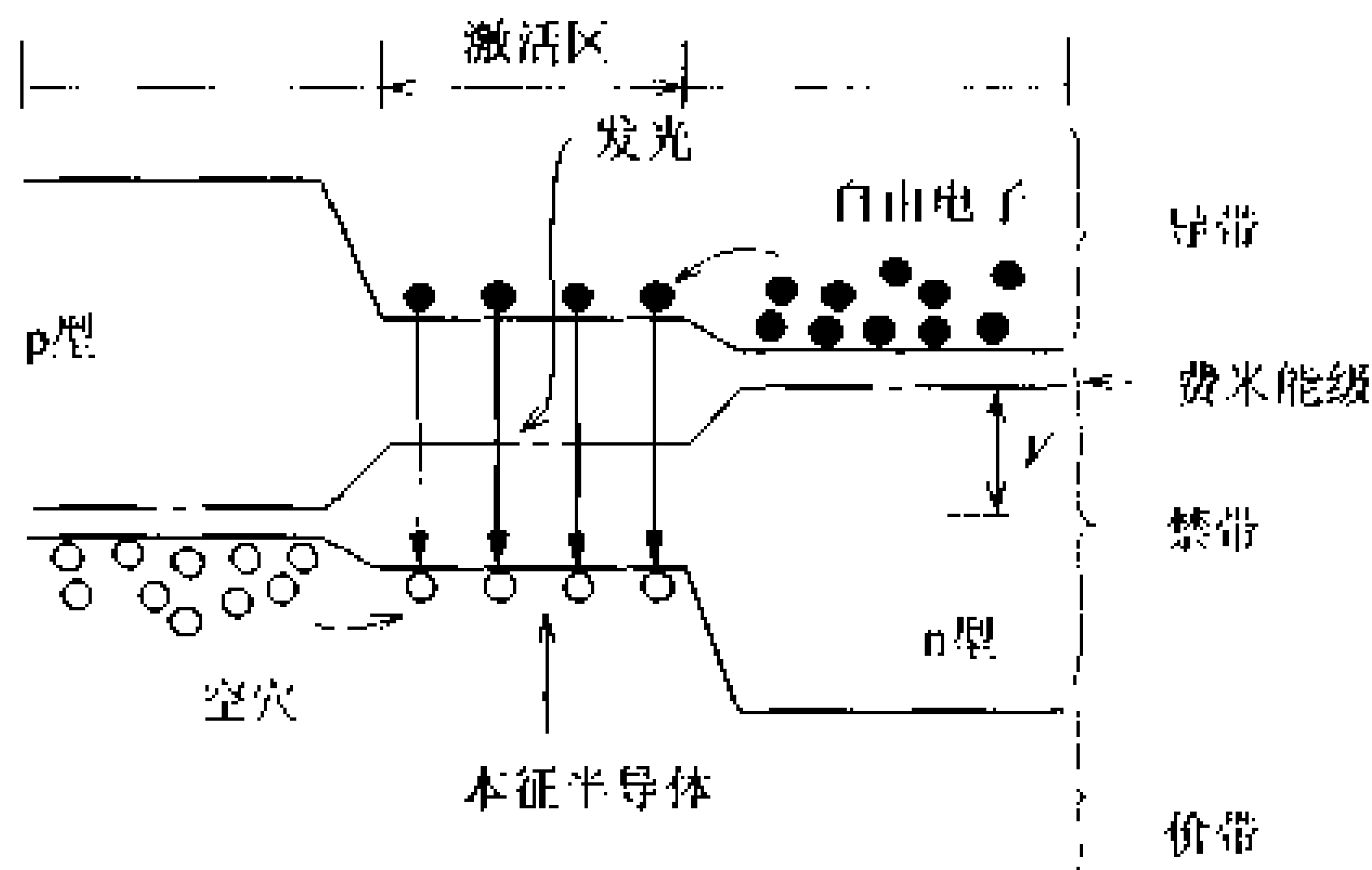


图 2.64 能带结构

和 n 型区域的都大。因此,发出的光就在结面上形成全反射而被封入激活区内。在结面上的全反射和向水面斜向入射的光发生全反射是一样的,当然水的折射率比空气的大。

入射到激活区端的光由于镜面反射,所以此光往返于激活区中。这时,被行进的光所诱发出的新光继续往返于激活区中。将这一发光机理称作诱发发光。所诱发的光是和诱发光相位相同,波长相同。因此,被放大的光在激活区中出现了共振状态,于是发生了相干光。

#### 诱发发光

### □ 相关知识 ● 相干光

相干光就是光的波长和相位呈现出某种一致性的状态(图 2.65)。在半导体激光器中,从多数原子发出的光,其波长和相位都具有一致性。扩播和无线通讯中所使用的电波,其波长和相位也具有相同的性质。与这种电波相当的光就是相干光(图 2.66)。如果使用相干光,那它和电波一样也能把信息变为信号进行传送。因为光的波长比电波的短得多,所以能让每单位时间的信息量飞跃地增加。不是相干的光称为非相干光。太阳的光和电灯的光等普通的光是非相干光。非相干发光的元件有发光二极管(如 LED)。

光器件中除了 LED 外,还有 pin 光电二极管(pin photo diode)和雪崩光电二极管以及光电晶体管等光敏元件。

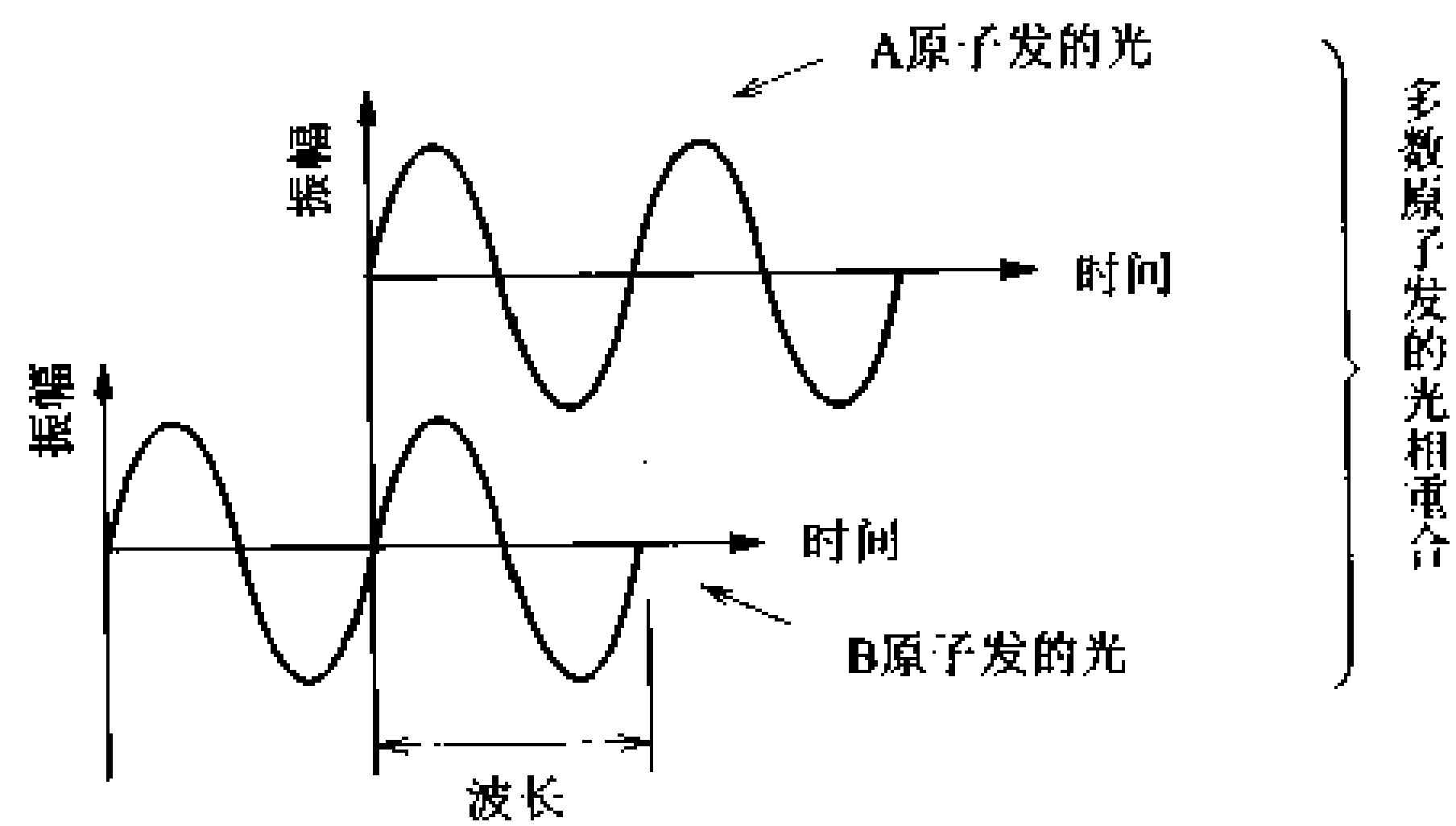


图 2.65 相干光的相位和波长

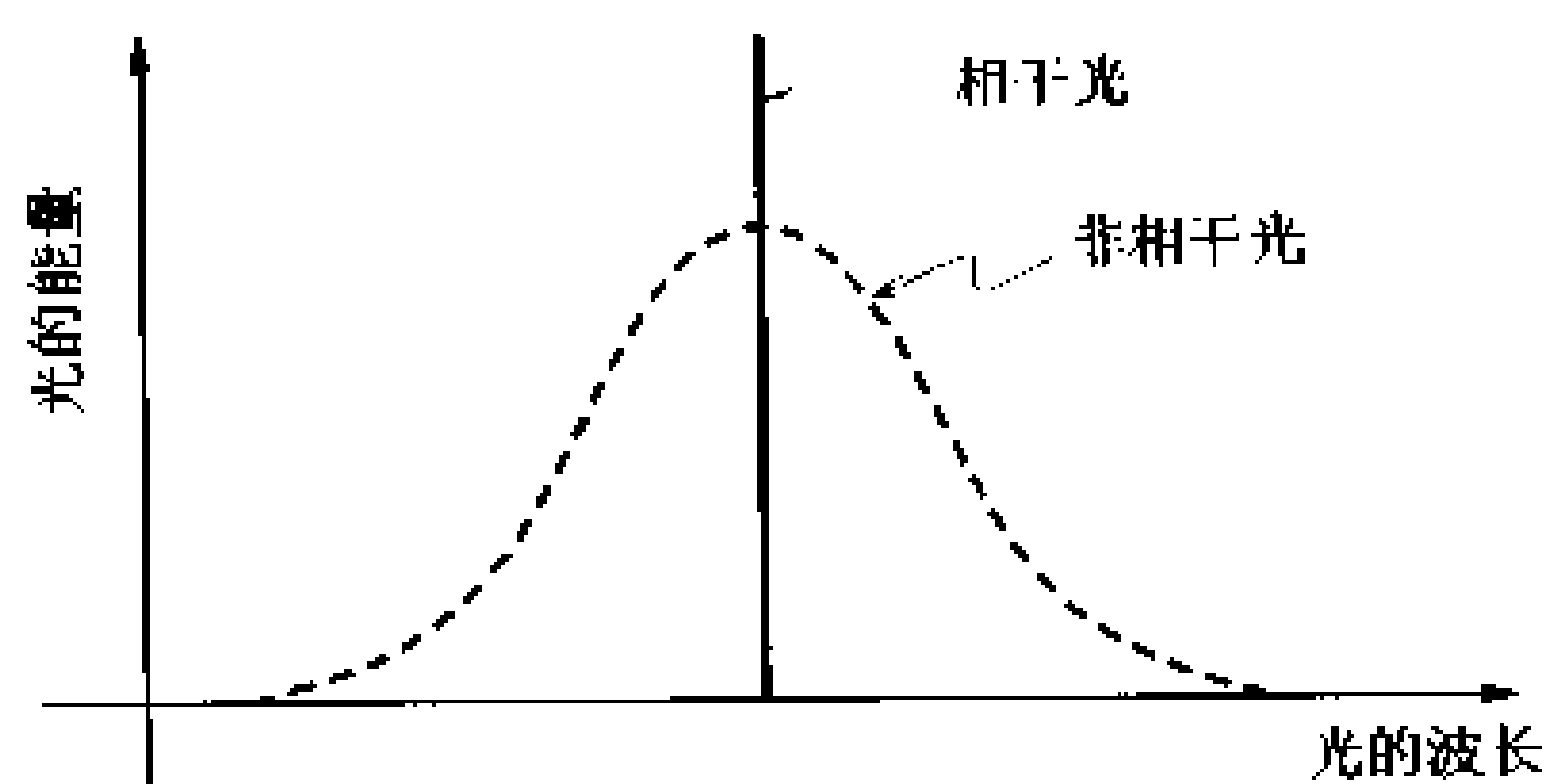


图 2.66 相干光的光谱



## 20 约瑟夫逊元件

### □ 要点

超导是一种在绝对零度附近时其电阻为零的现象。约瑟夫逊元件就是利用超导现象的一种高速开关器件。

### □ 解释 ● 超导现象

导体有电阻的原因是因为导体中有妨碍载流子移动的障碍。这个障碍中有晶格振动和晶格缺陷以及杂质等。晶格振动就是构成晶格的原子热振动。晶格缺陷就是构成晶格的原子有一部分缺少。从而，破坏了晶格的规则性。杂质就是混入晶体中不同种类的原子。这些东西的障碍程度随温度而改变。一般来说，这些障碍程度，在低温下是受晶格缺陷和离子化杂质的影响所支配。在高温下是受晶格振动的影响所支配。

因为晶格振动是原子的热振动，所以随温度下降而减弱。因此，在温度最低的绝对零度时，晶格缺陷和杂质都没有的导体，其电阻据说为  $0\Omega$ 。称这种现象为超导。称引起超导时的温度为临界温度。超导是在物体的某一固有温度下发生。临界温度比绝对零度高，这是源于电子具有波动性的关系。

超导

临界温度

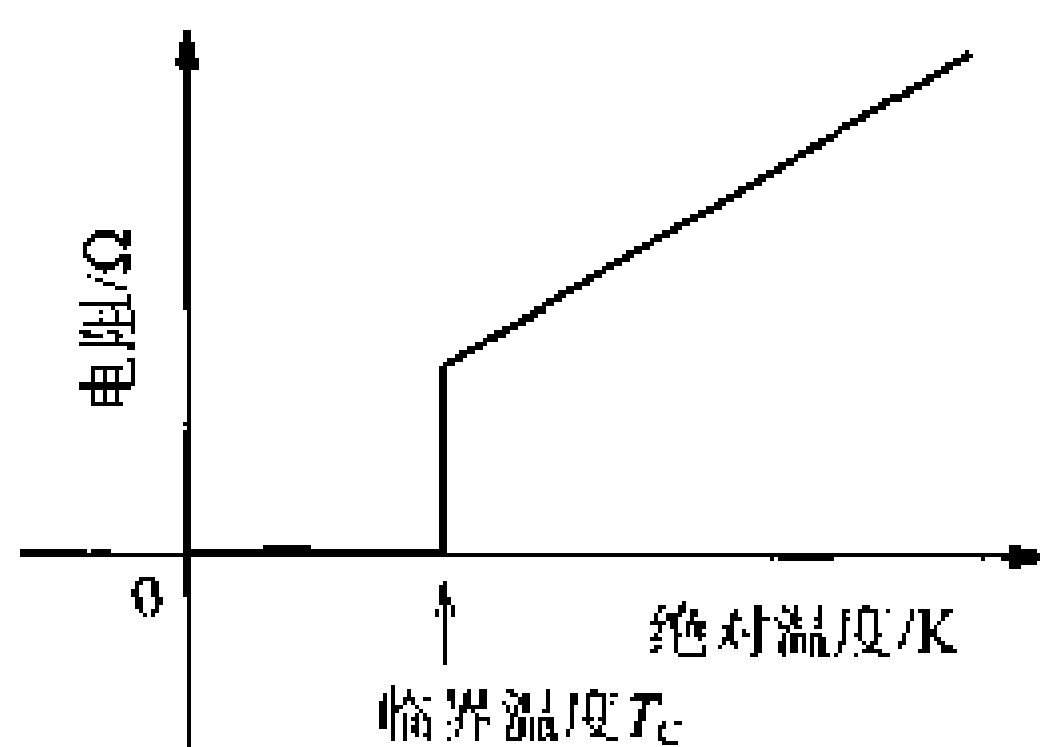


图 2.67 绝对零度附近的电阻

### ● 约瑟夫逊元件的结构和特性

约瑟夫逊效应

如果让二个处在超导状态的物体，在电气上进行弱耦合（约瑟夫逊结），即使在其两端不加偏压也有电流流过。称此现象为约瑟夫逊效应。像图 2.68 所示那样，如果将绝缘薄膜用超导体夹起来，这就成为电气上的弱耦合。

超导状态，有当超导体上所加磁场大于一定值时，它就回到常

约瑟夫逊元件

导状态的性质。如果用磁场来转换超导体的超导状态和常导状态,那么,它就可以作为开关加以利用(图2.69)。称能完成上述工作的元件为约瑟夫逊元件。这种开关的动作速度极其快(约数微微秒( $10^{-12}$ 秒))。

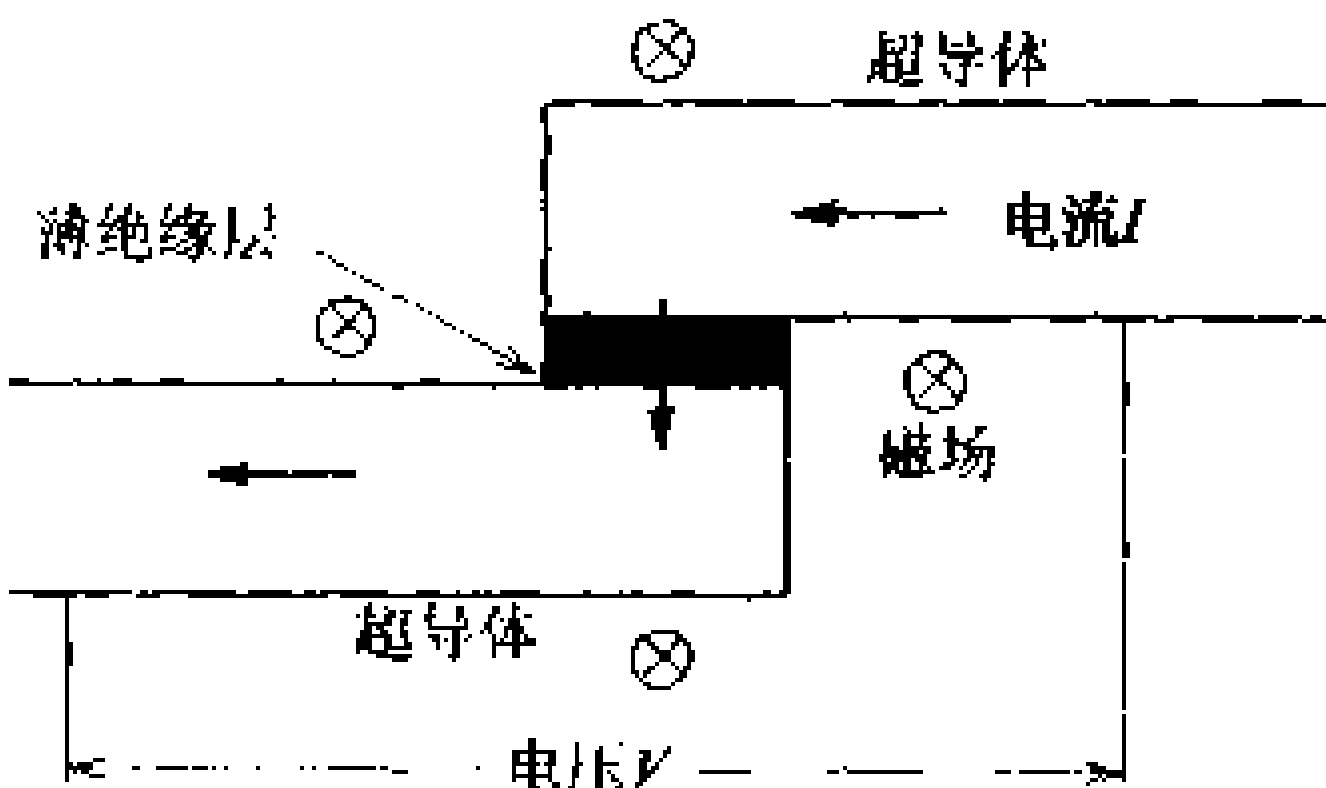


图 2.68 约瑟夫逊元件的原理

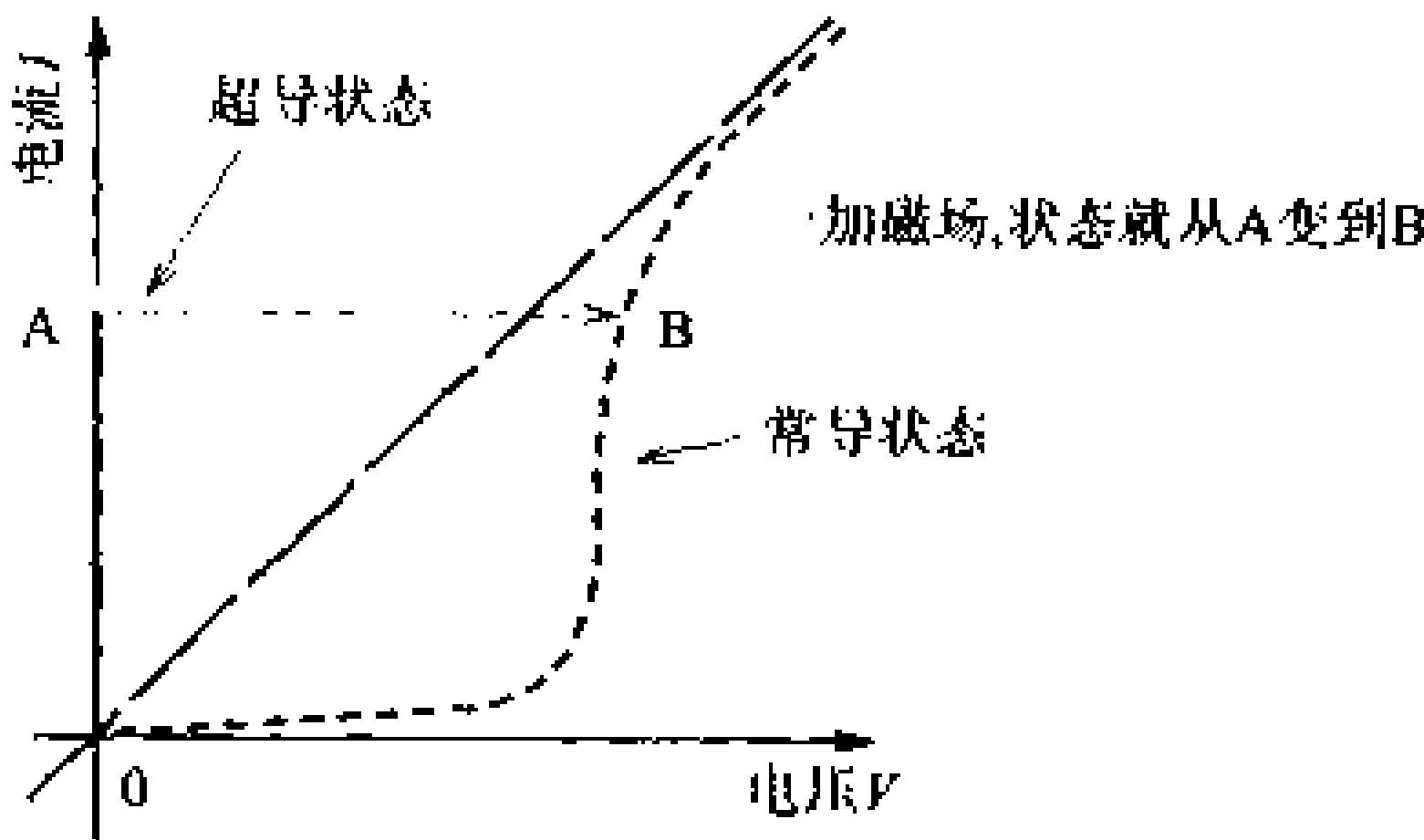


图 2.69 约瑟夫逊元件的开关动作

□ 相关知识 ● 超导的临界值

超导现象中有温度,磁场和电流密度大小的临界值。一超过这个临界值,状态就改变了。这里所说的状态是指超导状态和常导状态两种。所谓电流密度是流过每单位面积的电流。流过二根导线的电流即使相同,流过断面积小的导线,其电流密度大。临界温度随物质的不同有很大的不同。不同物质,它的临界温度也有在液态氮的沸点(77K)以上的。氧化物情况下也见到过在 125K 下表现出超导现象的物质。

### 单晶体的培育与生长

培育硅单晶体方法之一是切克劳斯基单晶体生长法(简称CZ法或称拉单晶体法)(如下图)。单晶体是以晶核为种子生长起来的。为了培育单晶体,必须有种子单晶体。可是,最初的种子单晶体又从何处获得呢?当然最初的种子单晶体也可以是多晶,多晶是由小单晶集合起来的。我们通常见到的冰就是由多晶形成的。如果把水自然冷冻,就成为多晶。如果将熔化的硅也自然降温,就成为多晶。如果把多晶作为种子让其生长,那么就能制成多晶的小单晶体并逐渐长大起来。长大的单晶体也可成为其它单晶体种子。另外,将培育起来的单晶体棒叫作坯料(或结晶块)。坯料一般被切成约0.5mm厚的薄片,将切成的薄片叫作单晶片(wafer),它是半导体元器件的基片。

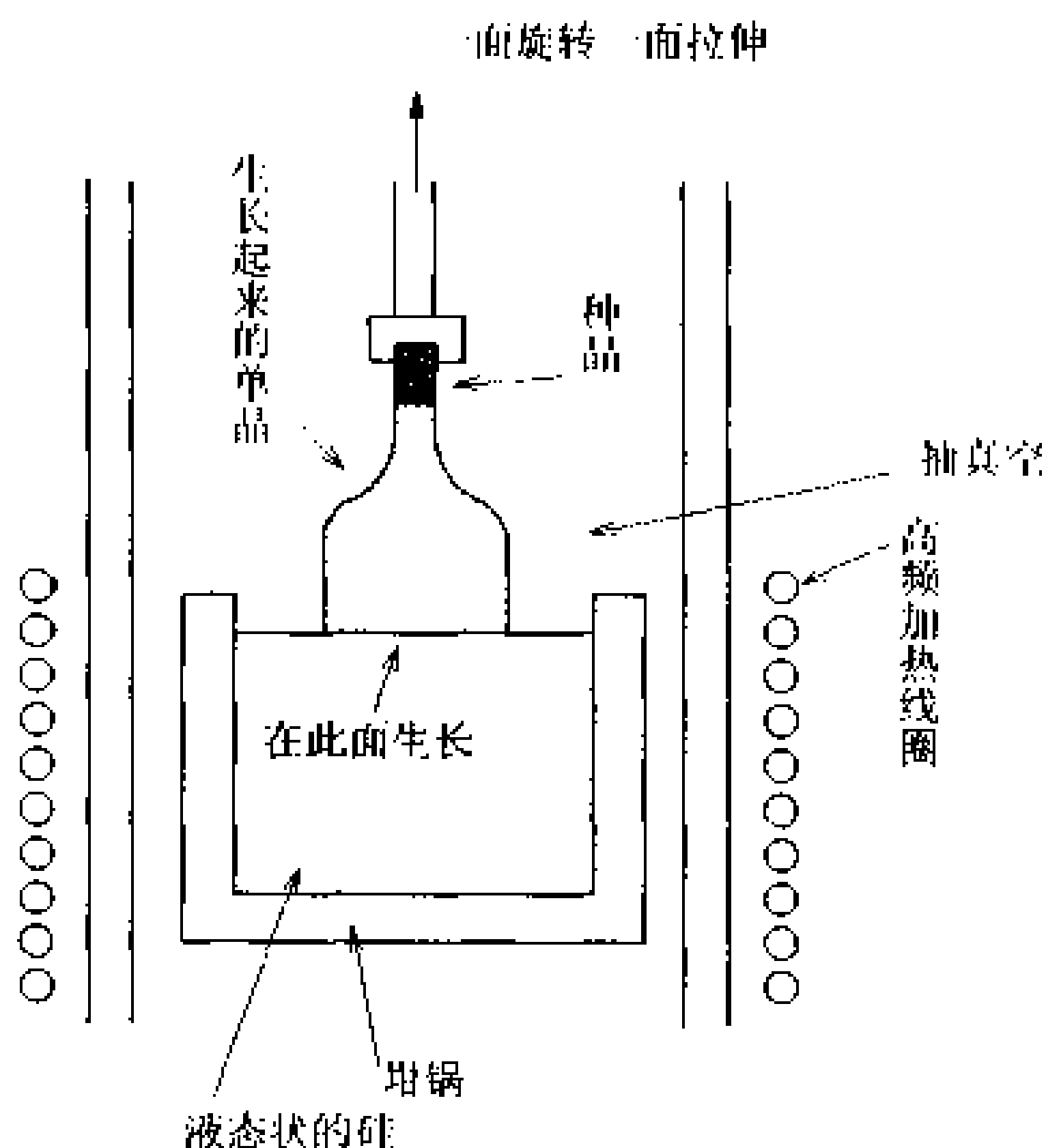


图 由拉伸法培育单晶体

## 第3章

# 模拟电子电路

我们将在本章中学习放大电路、振荡电路、调制电路、解调电路以及电源电路等模拟电子电路的基础知识。

放大电路将研究它的基本工作和特性，以及电路的特征与种类等；振荡电路将研究振荡原理，以及基本的LC振荡电路与CR振荡电路的工作原理。另外，还将研究目前数字电路等广为使用的晶体振荡电路。调制电路是在发射端将音频信号变成便于天线高效率发射的电波而采用的电路。与此相对应，解调电路是在接收端从来自接收天线的电波中取出原来音频信号的电路。在这里我们将学习这些电路的原理和应用等。

电源电路将学习从基础的整流电路到实用电路的工作原理。并将进一步研究把直流功率逆变换成交流功率的逆变器等的原理和应用例。

- 责任编委  
菅谷光雄
- 执 笔  
菅谷光雄(1~11)  
宫本 修(12~22  
及篇外话)

# 1 放大的原理

## □ 要点

放大原理就是用小输入信号来控制电源的能量,并使之变换成大的输出信号。晶体管能用小的基极电流控制大的集电极电流。把这个称作晶体管的放大作用。现在假定基极电流为  $I_B$ ,集电极电流为  $I_C$ ,那么发射极接地的直流电流放大系数  $h_{FE}$  可用式(3.1)表示

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad (3.1)$$

## □ 解释 ● $h_{FE}$ 和 $h_{fe}$ 的关系

图 3.1(a)所示的发射极接地电路, $I_B$  放大  $h_{FE}$  倍后成为  $I_C$ 。如图 3.1(b)所示电路,集电极和发射极之间的电压  $V_{CE}$  固定不变,而将基极上微小电压  $\Delta V_{BB}$  串接到直流电源  $V_{BB}$  上,此时,基极电流将发生微小变化  $\Delta I_B$ ,集电极电流也随之发生微小变化  $\Delta I_C$ 。将这时的  $\Delta I_C$  和  $\Delta I_B$  之比称作小信号电流放大系数,它可用式(3.2)表示

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (3.2)$$

小信号电流放大系数

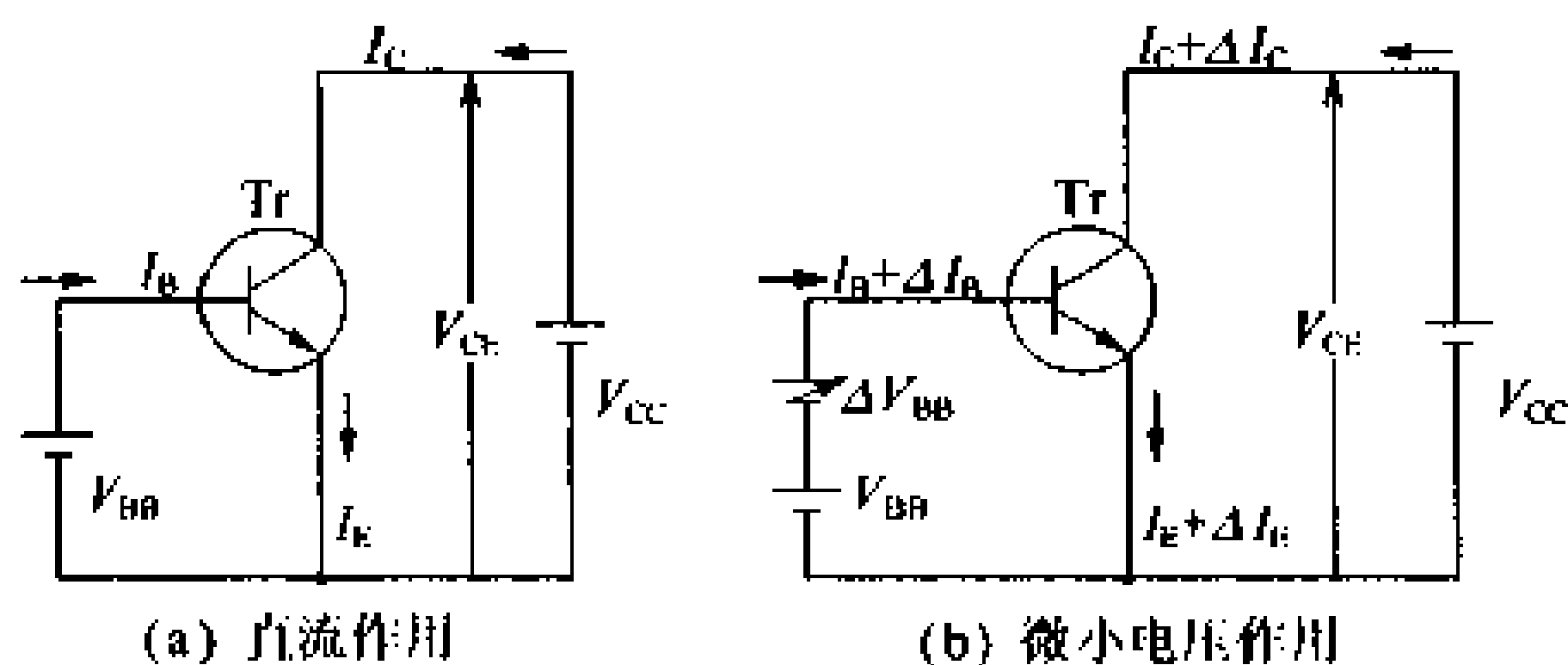


图 3.1 电流放大作用

$I_B$  和  $I_C$  关系,如图 3.2 的  $I_B$ - $I_C$  特性曲线所示,一般情况下,它不是直线。 $h_{FE}$  是表示曲线上某一点的  $I_C$  和  $I_B$  之比。 $h_{fe}$  则是表示  $I_C$  的微小变化部分对  $I_B$  的某一微小变化部分之比,所以  $h_{FE}$  和  $h_{fe}$ ,一般情况下,不是相同值。另外,也有将  $h_{FE}$  表示为  $\beta$  的, $\beta$  值约为  $10 \sim 10^4$ 。

## □ 相关知识 ● 基极接地方式的直流电流放大系数

如图 3.3 所示的基极接地电路,因为晶体管的发射极电流  $I_E$

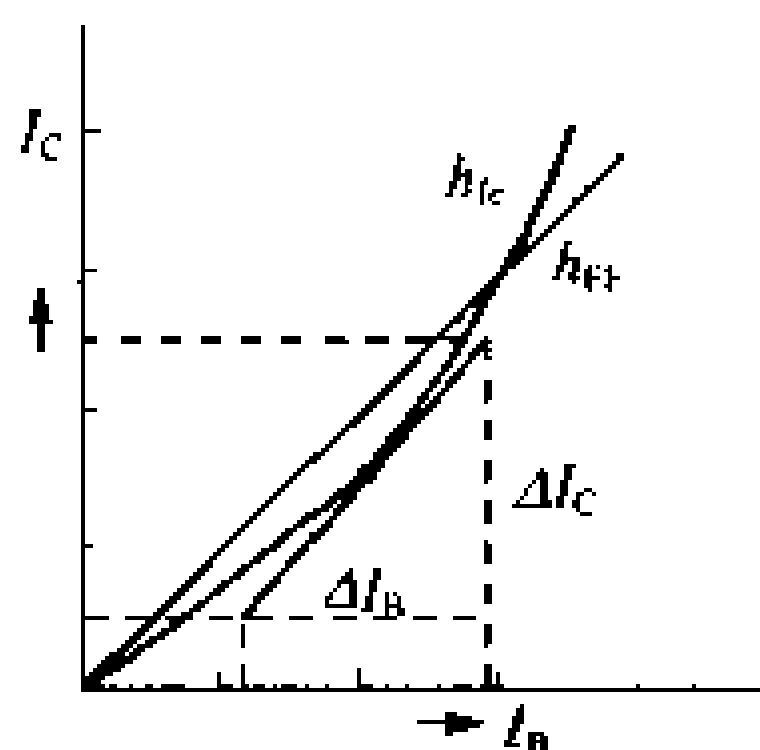
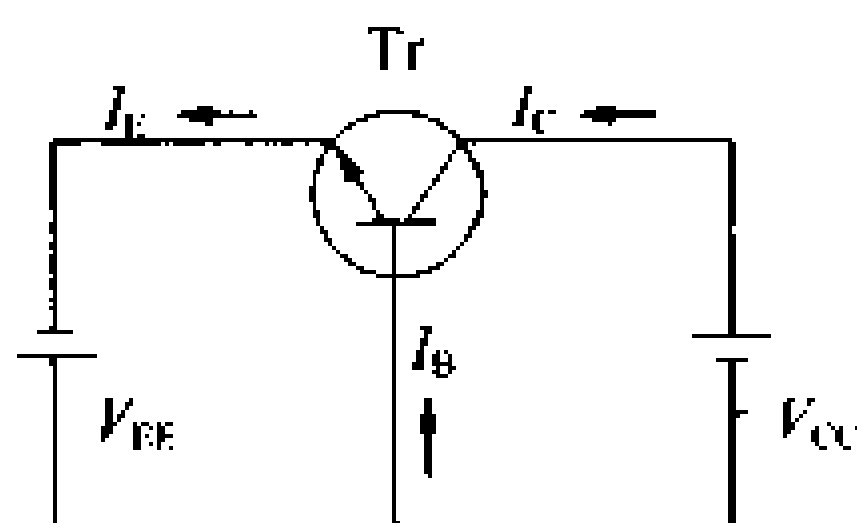
图 3.2  $I_B$ - $I_C$  特性曲线

图 3.3 基极接地电路

的极小一部分为基极电流  $I_B$ , 余下部分为集电极电流  $I_C$ , 所以, 式 (3.3) 的关系成立:

$$I_E = I_B + I_C \quad (3.3)$$

基极接地直流电  
流放大系数

将这时的  $I_C$  和  $I_E$  之比称作基极接地直流电流放大系数, 可用式 (3.4) 表示:

$$h_{FB} = \frac{I_C}{I_E} \quad (3.4)$$

有时  $h_{FB}$  也用  $\alpha$  表示,  $\alpha$  值约为  $0.9 \sim 0.999$ 。

### 例 题 有关电流放大系数的问题

试根据图 3.4 的  $V_{CE} - I_C$  特性曲线回答如下问题:

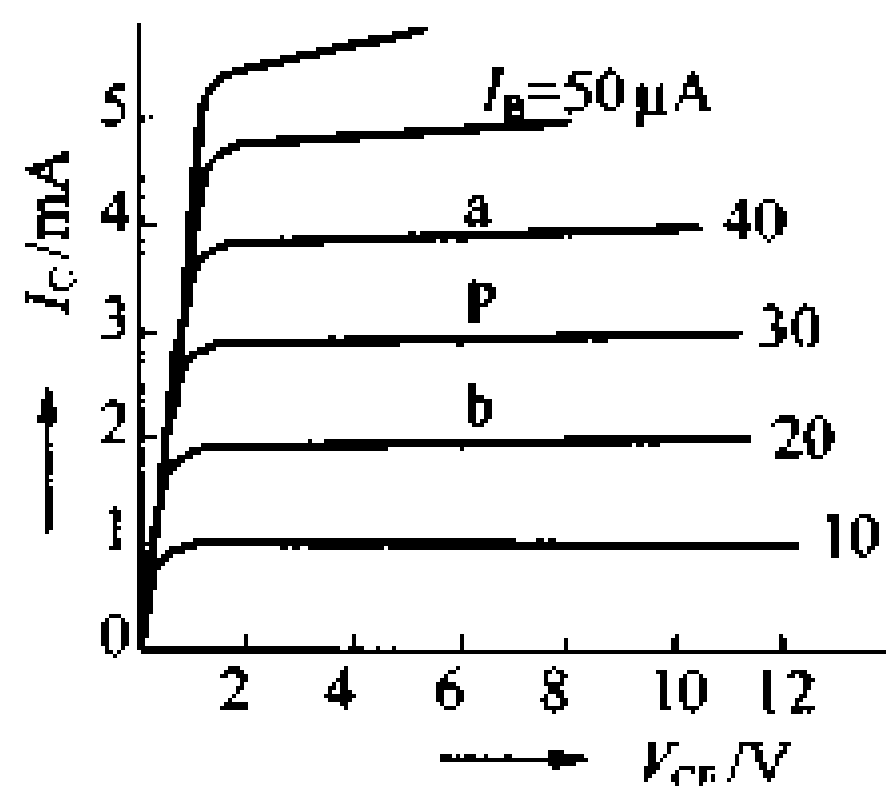
- ① 试求  $P$  点的发射极接地直流电流放大系数  $h_{FE}$  的值。
- ② 试求这时的基极接地直流电流放大系数  $h_{FB}$  的值。
- ③ 试求  $ab$  间的小信号电流放大系数  $h_{fe}$  的值。

**答** ①  $h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{3 \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-6}} = 100$

②  $h_{FB} = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_C}{I_B + I_C} = \frac{3 \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-6} + 3 \times 10^{-3}} \approx 0.99$

另一种解:  $h_{FB} = \frac{h_{FE}}{1 + h_{FE}} = \frac{100}{1 + 100} \approx 0.99$

③  $h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(4.0 - 2.0) \times 10^{-3}}{(40 - 20) \times 10^{-6}} = 100$

图 3.4  $V_{CE}$ - $I_C$  特性曲线

## 2 基本放大电路

### □ 要点

如果在晶体管的基极加一交流输入电压(输入信号),那么就能从与集电极相连接的电阻两端取出交流输出电压(输出信号)。将这种电路称作基本放大电路。输出电压的大小,能够由电阻值的加大来得到,比加到基极的交流输入电压大的电压。这样一来,用连接到集电极上的电阻,也就能够将交流电压放大。因此,把连接的电阻叫作负载电阻。

### □ 解释 ● 输出电压的大小

如图 3.5 所示那样的基本放大电路,假如交流输入电压  $v_i = 0$ ,那么,负载电阻  $R_L$  两端的电压  $V_o$  可用下式表示:

$$V_o = -I_c R_L \quad (3.5)$$

式(3.5)的负号是因为在图 3.5 的发射极接地放大电路中,输出电压相对于输入电压的方向是相反的。另外,集电极电压  $V_{CE}$  可用式(3.6)表示:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_c R_L \quad (3.6)$$

其次,在基本电路里,假如加在基极上的输入电压为  $v_i$ ,那么,负载电阻  $R_L$  两端的电压,如式(3.7)所示那样,是直流和交流的输出电压之和:

$$V_o + v_o = -(I_c + i_c) R_L \quad (3.7)$$

因此,交流输出电压  $v_o$  可用式(3.8)表示:

$$v_o = -i_c R_L \quad (3.8)$$

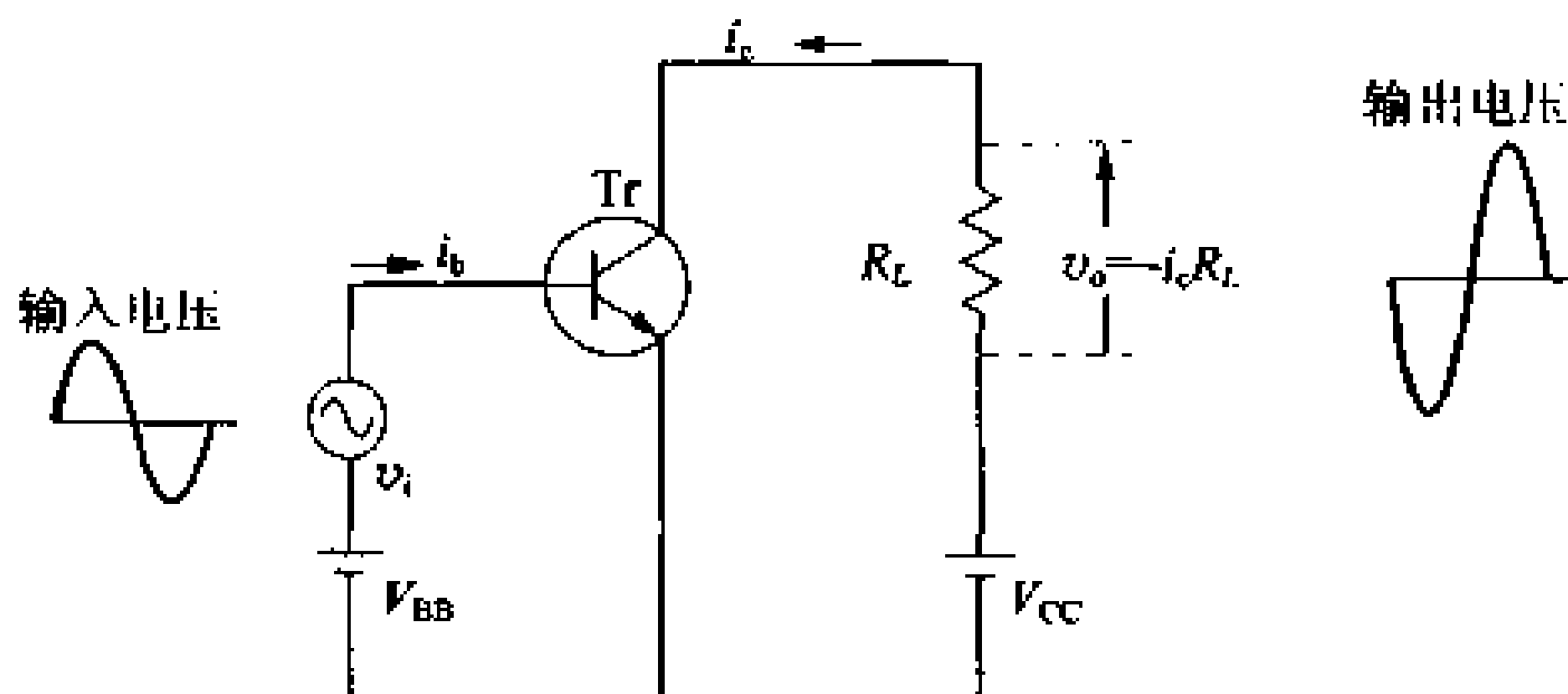


图 3.5 基本放大电路

## □ 相关知识 ● 负载电阻上所消耗的交流输出功率

在图 3.5 上, 负载电阻  $R_L$  所消耗的交流输出功率可用下式表示:

$$p_o = i_c^2 R_L = \frac{v_o^2}{R_L} = |v_o i_c| \quad (3.9)$$

而交流输入功率  $p_i$  可用下式表示:

$$p_i = v_i i_b \quad (3.10)$$

因此,  $v_o$  的可比  $v_i$  大, 同时, 因为  $i_c$  也可比  $i_b$  增大, 所以  $p_o > p_i$ , 故功率也能放大。

## ● 晶体管各部分的波形

如式(3.7)所示那样, 晶体管各部分的电压和电流是直流和交流之和。图 3.6 给出了各部分的电压和电流的波形。输出电压与输入电压相位相反, 相差  $180^\circ$ 。

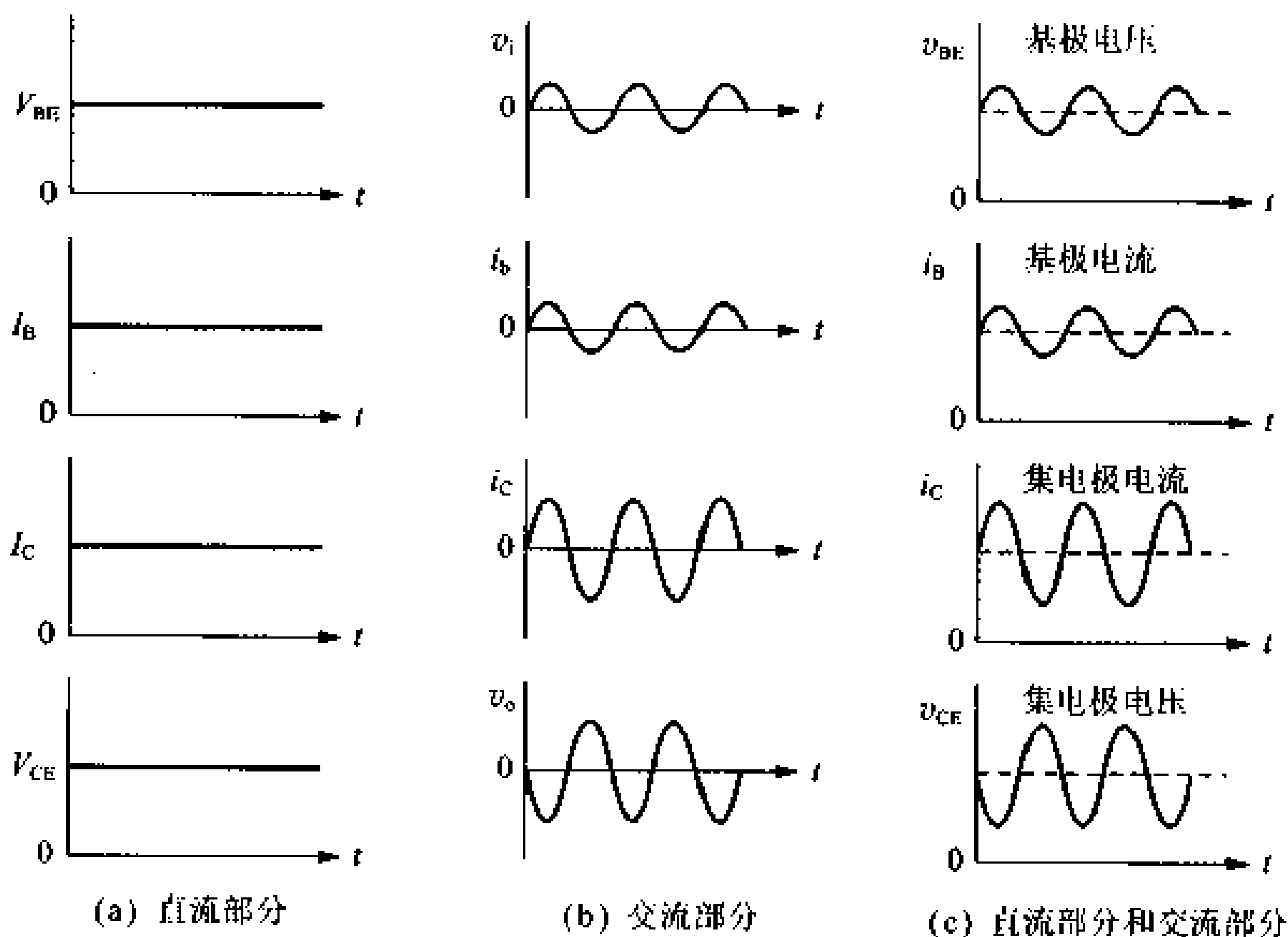


图 3.6 各部分的电压和电流的波形



## 3 放大电路的动态特性

### □ 要点

晶体管是以直流部分为中心叠加交流部分进行工作的。把这个直流电压和直流电流中心值称作晶体管的偏置电压和偏置电流,简称为偏压和偏流。

将晶体管上接有负载时的特性称为动态特性。由负载电阻决定的负载线上的工作点,其直流电压值和电流值就是偏值。为了让晶体管工作,偏值是必须的。如果加的偏压适当,则输入信号不会失真且能放大,并能在负载上得到与输入信号相同形状的输出波形(正弦波)。

### □ 释 ● 负载线和工作点

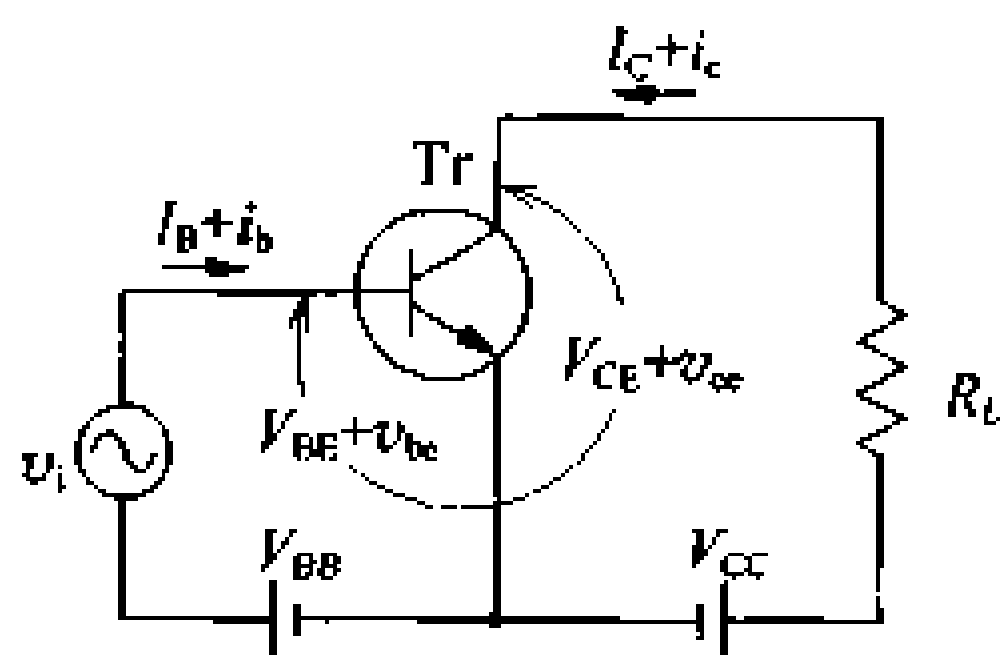
在如图 3.7(a)所示的发射极接地的基本放大电路中,集电极电压  $V_{CE}$  可用式(3.11)表示

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L \quad (3.11)$$

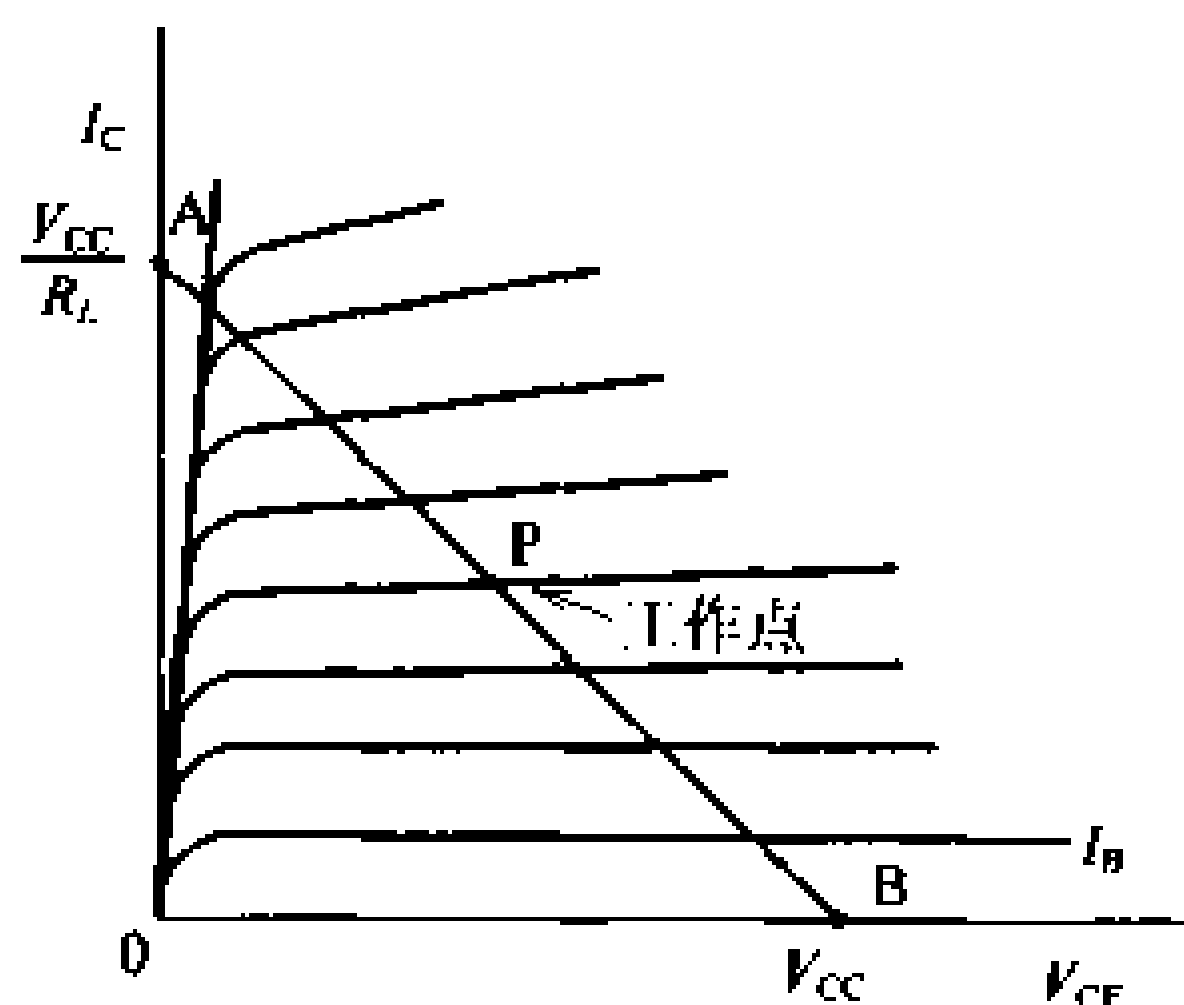
如果将式(3.11)的关系描绘在图 3.7(b)所示的晶体管  $V_{CE}$  -  $I_C$  特性曲线上,那么,这就得连接图中 A 点和 B 点的直线。由式(3.11),如令  $V_{CE} = 0$ ,即图中 A 点,那么,  $I_C = V_{CC}/R_L$ ; 如果令  $I_C = 0$ ,即图中 B 点,那么,  $V_{CE} = V_{CC}$ 。因为这条直线 AB 的斜率是由负载电阻  $R_L$  决定,故称这条直线为负载线。另外,在由偏压决定的图中,把负载线上的 P 点称作工作点。为了振幅大的信号进行放大而且不失真,这个工作点应定在负载线的几乎中央的位置。如果像这样给出适当的偏压,那么,输出电压和输出电流的波形就可得到失真很小的正弦波。

负载线  
工作点

$v_{be}$ : 交流部分的基极电压的瞬间值  
 $v_{ce}$ : 交流部分的集电极电压的瞬间值



(a) 基本放大电路  
(直流上加交流时)



(b) 负载线

图 3.7 放大电路的动态特性

## □ 相关知识 ● 工作点的分类和特征

在像图 3.8 所示那样的特性曲线上, 工作点可分为三类:

① A 类工作点( $P_1$  点): 波形失真很小, 它适合小信号放大。

② B 类工作点( $P_2$  点): 功率损耗很小, 电源效率高。常用在 B 类推挽功率放大电路上。

③ C 类工作点( $P_3$  点): 波形失真大, 不过电源效率高。常用在高频功率放大电路上。

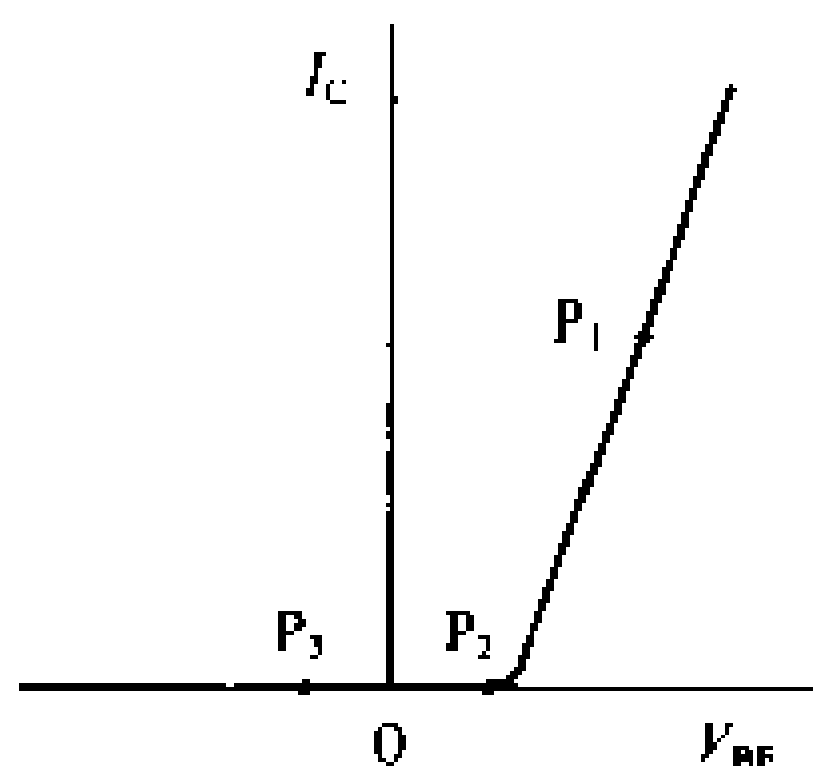


图 3.8 根据工作点的分类

## ■ 例 题 关于负载线和工作点的问题

在基本放大电路中, 把电源电压  $V_{CC} = 12\text{V}$ 、负载电阻  $R_L = 3\text{k}\Omega$  时的负载线描绘在图 3.9 所示那样的  $V_{CE}-I_C$  特性曲线上, 并把负载线中央定为工作点时, 试求工作点处  $V_{CE}$  和  $I_C$  以及  $I_B$  的值。另外, 再求出输入正弦波电流振幅  $i_b = 10\mu\text{A}$  时的输出电流的振幅  $i_c = ?$ 。

**答** 为了求负载线, 首先连接特性曲线上  $V_{CE} = 0, I_C = V_{CC}/R_L = 12/(3 \times 10^3) = 4\text{mA}$  的 A 点和  $I_C = 0, V_{CE} = V_{CC} = 12\text{V}$  的 B 点的 AB 直线。工作点选择这条负载线的中央, 从图就可得到  $V_{CE} = 6\text{V}, I_C = 2.0\text{mA}$  以及  $I_B = 20\mu\text{A}$ 。另外, 基极电流  $i_b$  如图所示, 它以  $20\mu\text{A}$  为中心, 在  $\pm 10\mu\text{A}$  之间变化, 所以, 集电极电流  $i_c$  在负载线上的  $P_1$  和  $P_2$  之间变化, 变化量为  $\pm 1.0\text{mA}$ 。由此得输出电流的振幅为  $1.0\text{mA}$ 。

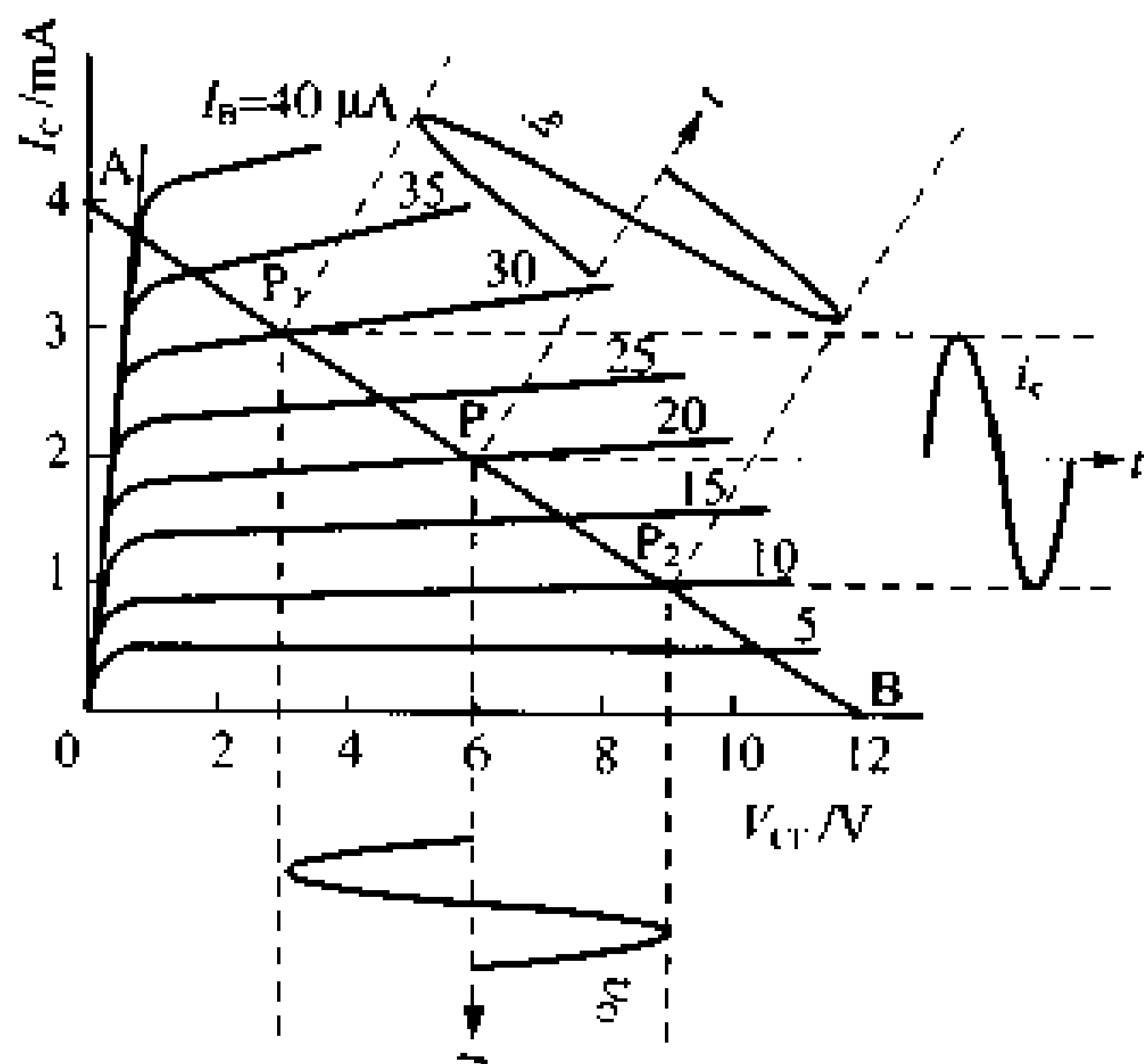


图 3.9 负载线和工作点

## 4 偏压电路(I)

### □ 要点

晶体管的工作点是随温度变化和电源电压的变化而移动。工作点一移动,往往会发生输出波形失真、热失控(晶体管的温度连续上升)的现象,严重时,超过最大额定值,造成晶体管损坏。因此,偏压电路的设计必须使放大电路的工作点稳定。一般情况下,偏压的稳定度应该像式(3.12)那样定义。无论是哪种定义,都是值越小工作点的稳定度越好。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{相对于 } I_{\text{CBO}} \text{ 的稳定系数} & S_1 = \frac{\Delta I_{\text{C}}}{\Delta I_{\text{CBO}}} \\ \text{相对于 } V_{\text{BE}} \text{ 的稳定系数} & S_2 = \frac{\Delta I_{\text{C}}}{\Delta V_{\text{BE}}} [\text{S}] \\ \text{相对于 } h_{\text{FE}} \text{ 的稳定系数} & S_3 = \frac{\Delta I_{\text{C}}}{\Delta h_{\text{FE}}} [\text{A}] \end{array} \right\} \quad (3.12)$$

### □ 解释 ● 偏压电路

偏压电路有双电源方式和单电源方式两种。将图 3.10 所示那样的偏压电路称为双电源方式。这种偏压方法用了基极直流电源  $V_{\text{BB}}$  和集电极直流电源两个电源,它和基本放大器不同的地方是在基极直流电源上串联着电阻  $R_{\text{B}}$ ,因此,这种偏压方法能将基极电流  $I_{\text{B}}$  调整到适当值。

与此相对应,将图 3.11 所示的偏压电路称作单电源方式,这种方式是共用一个集电极直流电源  $V_{\text{CC}}$ 。

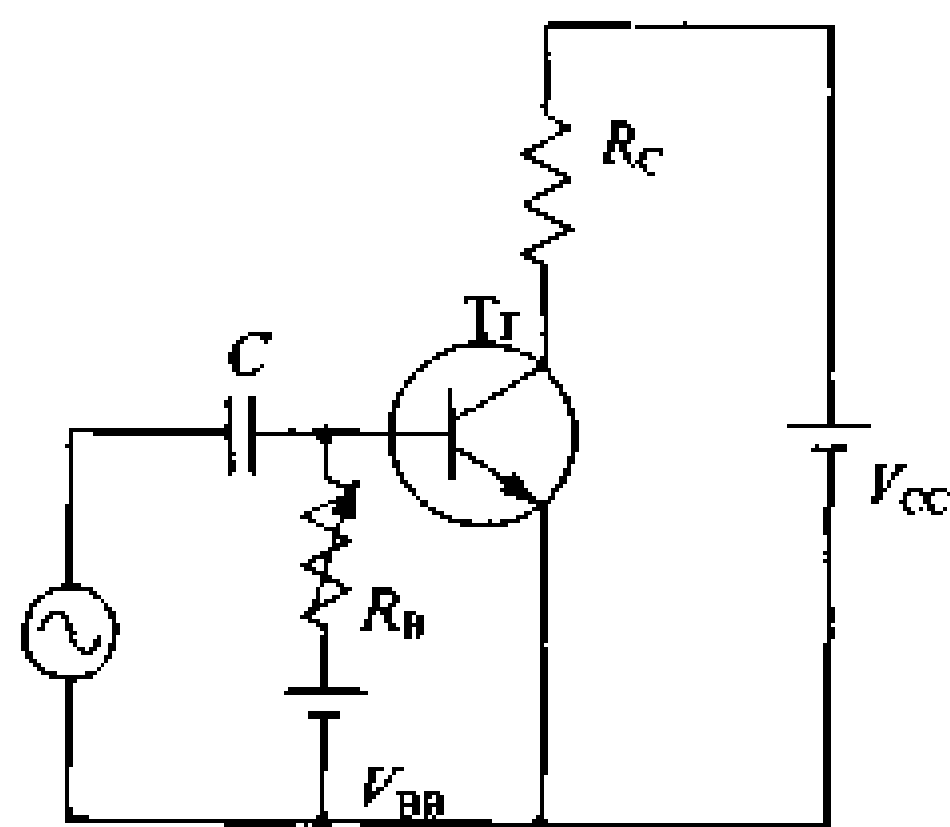


图 3.10 双电源方式

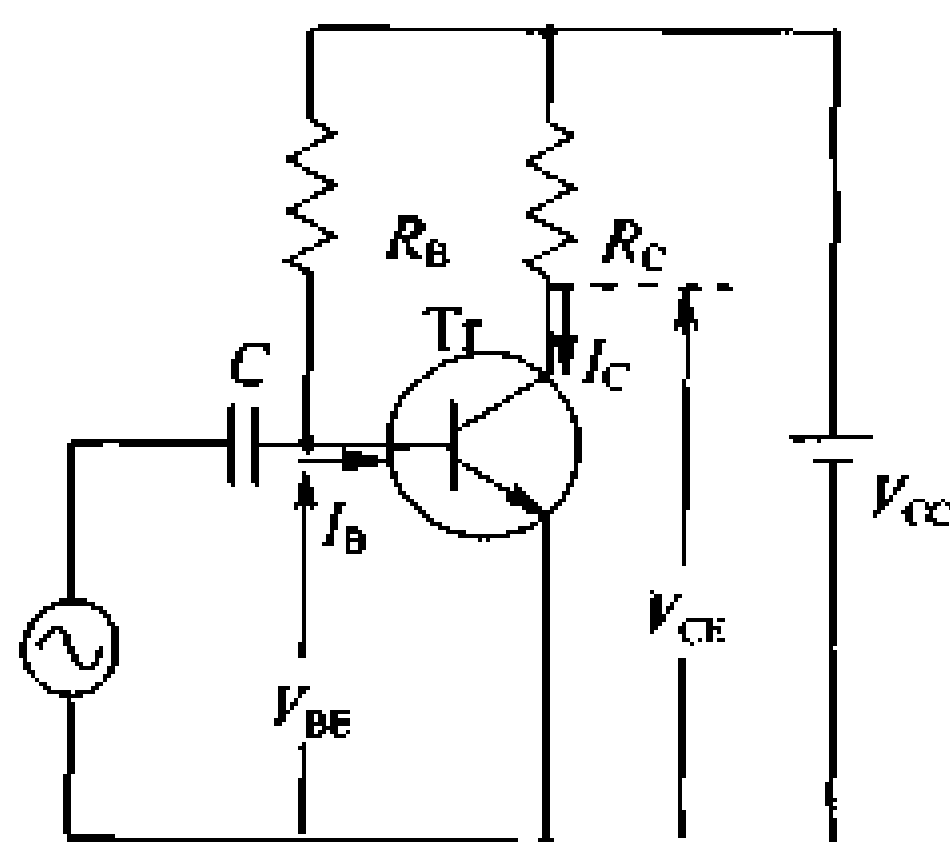


图 3.11 单电源方式

### □ 相关知识 ● 固定偏压电路

图 3.11 示的电路是采取由电源电压  $V_{\text{CC}}$  和偏压电阻  $R_{\text{B}}$  产生

## 固定偏压电路

基极电流  $I_B$  的方法。如果集电极直流电源  $V_{CC}$  给定, 则基极电流  $I_B$  几乎不变, 所以一般称其为固定偏压电路。基极电流  $I_B$  可用下式表示:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (3.13)$$

晶体管基极和发射极之间的电压  $V_{BE}$ , 硅晶体管时约是  $0.6V$ , 锗晶体管时约是  $0.2V$ 。

集电极电流  $I_C$  可用式(3.14)表示

$$I_C = h_{FE} I_B = h_{FE} \times \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (3.14)$$

在式(3.14)中,  $I_C$  相对于  $V_{BE}$  的变化较小, 而相对于  $h_{FE}$  的变化较大的缺点。为了减小输出失真, 应按照晶体管集电极和发射极之间的电压  $V_{CE}$  约等于电源电压  $V_{CC}$  的  $1/2$  那样来选集电极电流  $I_C$ 。

### 例 题 关于偏压问题

试求图 3.12 所示那样的固定偏压电路, 当  $V_{CC} = 12V$ ,  $I_C = 4mA$  时的  $R_B$  大小。这里假定  $h_{FE} = 200$ ,  $V_{BE} = 0.6V$ 。

**答** 首先, 基极电流  $I_B$  为

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{4 \times 10^{-3}}{200} = 0.00002A = 20\mu A$$

因此, 偏压电阻  $R_B$  可依据式(3.13), 求得

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 0.6}{20 \times 10^{-6}} = 570k\Omega$$

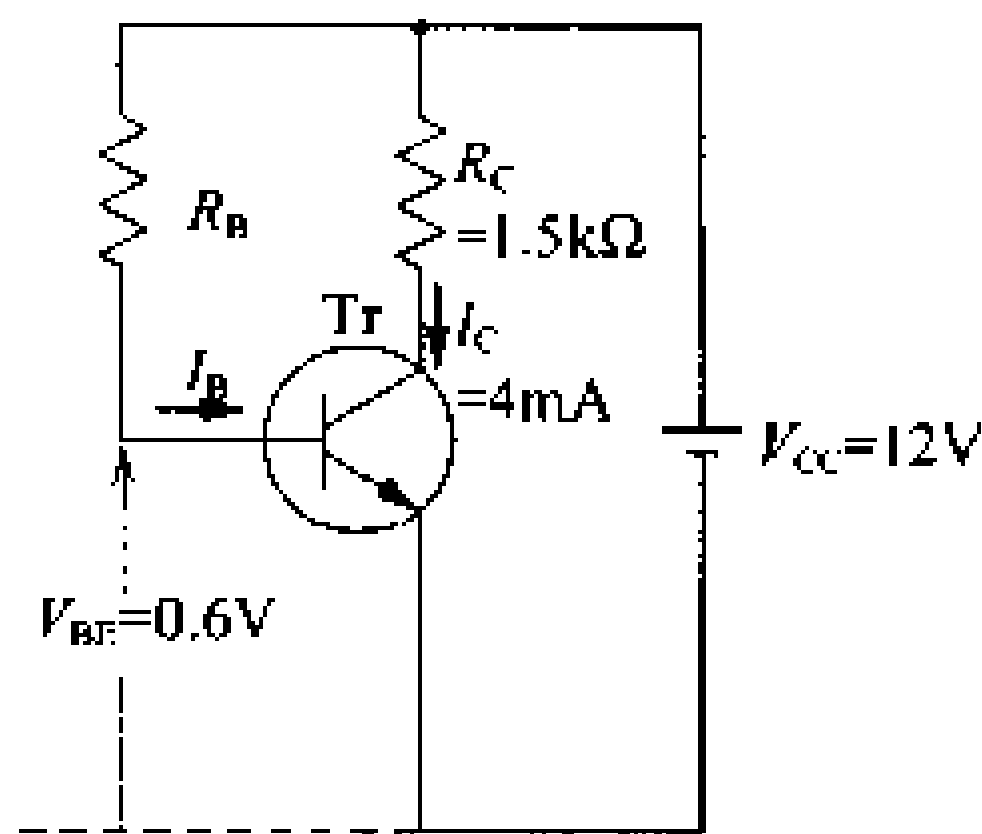


图 3.12 固定偏压电路

## 5 偏压电路(Ⅱ)

### □ 要 点

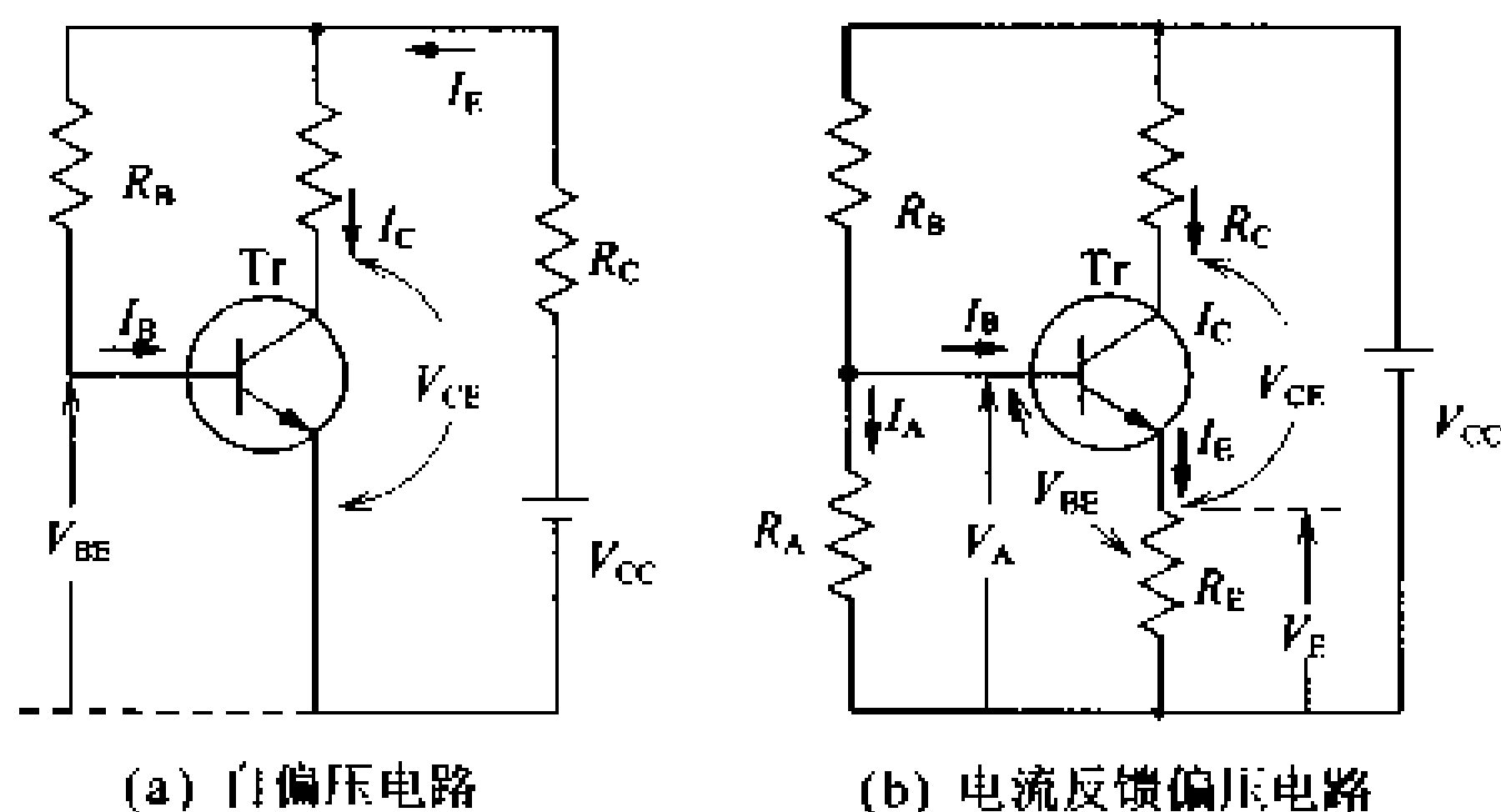
偏压电路的稳定度,不仅对温度变化有要求,而且对晶体管的特性的分散性也有要求。特别是晶体管的  $h_{FE}$ ,即使同一产品,其  $h_{FE}$  大小的差别也在 2 倍左右。因此,稳定度不好的电路的工作点有时会由于  $h_{FE}$  的分散而严重偏离设计值。在固定偏压电路里,如果  $h_{FE}$  的分散达到 2 倍,集电极电流的变化也就达到 2 倍,所以,偏压稳定度不好。为了在  $h_{FE}$  有分散情况下得到好的稳定度,希望当  $I_C$  增大时,电路能自动地使  $I_B$  减小,这就是自偏压电路(电压反馈电路)和电流反馈偏压电路。

### □ 解 释

自偏压电路

### ● 自偏压电路和电流反馈偏压电路

图 3.13(a)所示那样的自偏压电路中,基极电流  $I_B$  是从集电极电压  $V_{CE}$  出发,通过  $R_B$  流进基极电流  $I_B$  的。



(a) 自偏压电路

(b) 电流反馈偏压电路

图 3.13 偏压电路

现在令  $I_B \approx I_C$ , 那么,基极电流  $I_B$  可用式(3.15)表示:

$$I_B = \frac{V_{CE} - V_{BE}}{R_B} = \frac{V_{CC} - I_C R_C - V_{BE}}{R_B} \quad (3.15)$$

在式(3.15)中,如果  $I_C$  增大,则  $R_C$  上的压降  $I_C R_C$  增大,  $I_B$  就自动减少,从而阻止了  $I_C$  的增加。

这个电路与固定偏压电路相比,稳定度变好。可是,输入阻抗和增益下降是它的缺点。

图 3.13(b)所示那样的电流反馈偏压电路,因为偏压的稳定度最好,所以,一般情况下,多使用这种电路。分压电阻  $R_A$  和  $R_B$  从电

电流反馈偏压  
电路  
分压电阻

发射极电阻  
(稳定电阻)

源电压  $V_{CC}$  取得分压电压,发射极电阻(稳定电阻)  $R_E$  的作用是稳偏压。

图 3.13(b)中的  $V_{BE}$  可用下式表示:

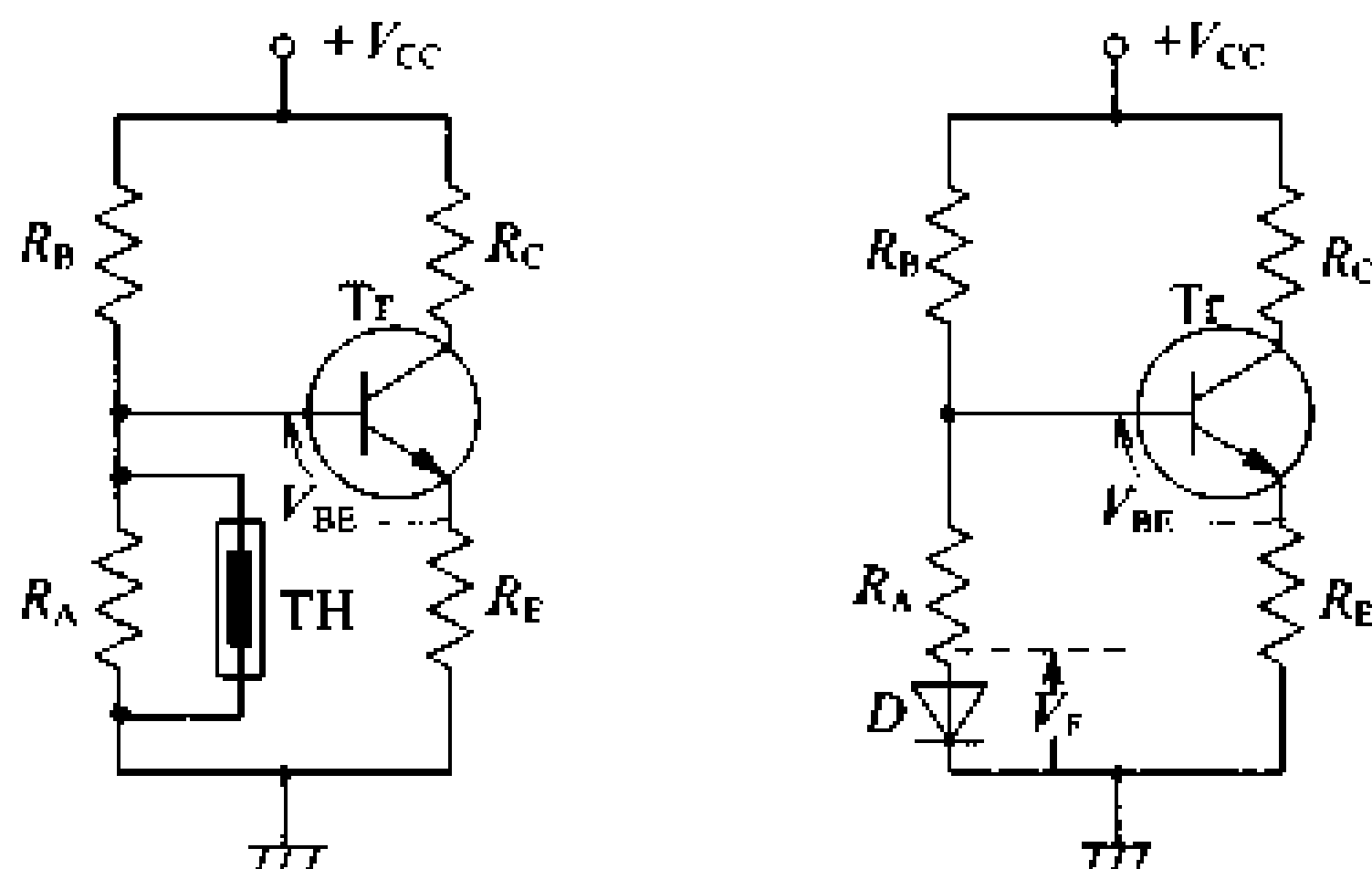
$$V_{BE} = V_A - V_F = V_A - I_E R_E = V_A - (I_B + I_C) R_E \quad (3.16)$$

在式(3.16)中,当  $I_C$  增加时,  $I_E R_E$  也增加,从而使  $V_{BE}$  减少。于是  $I_B$  减少,其结果是,  $I_C$  的增加受到抑制。越加大  $V_E$ , 稳定度会越变好。可是,一般来说,  $V_E$  是按  $V_{CC}$  的 10% 左右进行设计的。由于这个电路中  $R_A$  和  $R_B$  也是与输入并联,所以,输入阻抗减小。

## □ 相关知识 ● 温度补偿电路

在电流反馈偏压电路中,如果  $R_E$  过大,集电极和发射极之间的电压  $V_{CE}$  就减小,因此得不到大的信号输出。为了在  $R_E$  小的情况下提高稳定度,可像图 3.14 所示那样,采用特性随温度变化的元件(热敏电阻 TH 和二极管 D)对温度变化进行补偿。图 3.14(a)是在  $R_A$  上并联一个阻值随温度上升而变小的热敏元件的温度补偿电路。

图 3.14(b)是将  $R_A$  和二极管串联连接,利用二极管正向电压  $V_F$  和  $V_{BE}$  随温度变化几乎是相同这一特性的温度补偿电路。



(a) 采用热敏电阻的温度补偿电路 (b) 采用二极管的温度补偿电路

图 3.14 温度补偿电路

## ■ 应用基础 偏置电流与偏置电压

偏置电流和偏置电压是决定晶体管的工作中心点的,但不需要进行非常精确地设计。在电流反馈偏压电路中,基极电流非常小,即使假定  $I_B \approx 0$ ,求得的偏压和偏流的误差也在百分之几以内,实用中已经足够了。

## 6 $h$ 参数和等效电路

### □ 要 点

放大电路可用有二个输入端和有二个输出端的四端网络来表示。将这时的输出电压和输入电压之比的绝对值称为电压放大系数。将输出电流与输入电流之比的绝对值称为电流放大系数。另外将输出功率和输入功率之比称为功率放大系数。

电压放大系数和电流放大系数可从对应的交流电路求得。如果把晶体管部分置换成容易计算的元件,放大系数等的求取就方便多了。把能和晶体管置换而又具有相同作用的其它电路称作晶体管的等效电路。等效电路可以用  $h$  参数表示。

### □ 解 释 ● $h$ 参数和等效电路

在图 3.15 所示的四端网络中,假定输入输出电压与电流的最大值分别为  $V_{im}$ 、 $I_{im}$ 、 $V_{om}$ 、 $I_{om}$ ,那么,电压放大率  $A_v$ 、电流放大率  $A_i$  以及功率放大率  $A_p$  可用下式表示:



图 3.15 四端网络

$$A_v = \frac{V_{om}}{V_{im}} \quad A_i = \frac{I_{om}}{I_{im}}$$

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{\frac{1}{2} \times V_{om} I_{om}}{\frac{1}{2} \times V_{im} I_{im}} = \frac{V_{om} I_{om}}{V_{im} I_{im}} \quad (3.17)$$

参数  $h$  (常数  $h$ )

其次,在如图 3.16(a)所示的发射极接地的晶体管电路里,可从各电压与电流的变化量,如式(3.18)那样来定义参数  $h$  (常数  $h$ ):

$$h_{ie} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} \quad (V_{CE} \text{ 为定值})$$

$$h_{ie} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \quad [\Omega] \quad (V_{CE} \text{ 为定值})$$

$$h_{oe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \quad [S] \quad (I_B \text{ 为定值})$$

$$h_{re} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \quad (I_B \text{ 为定值})$$

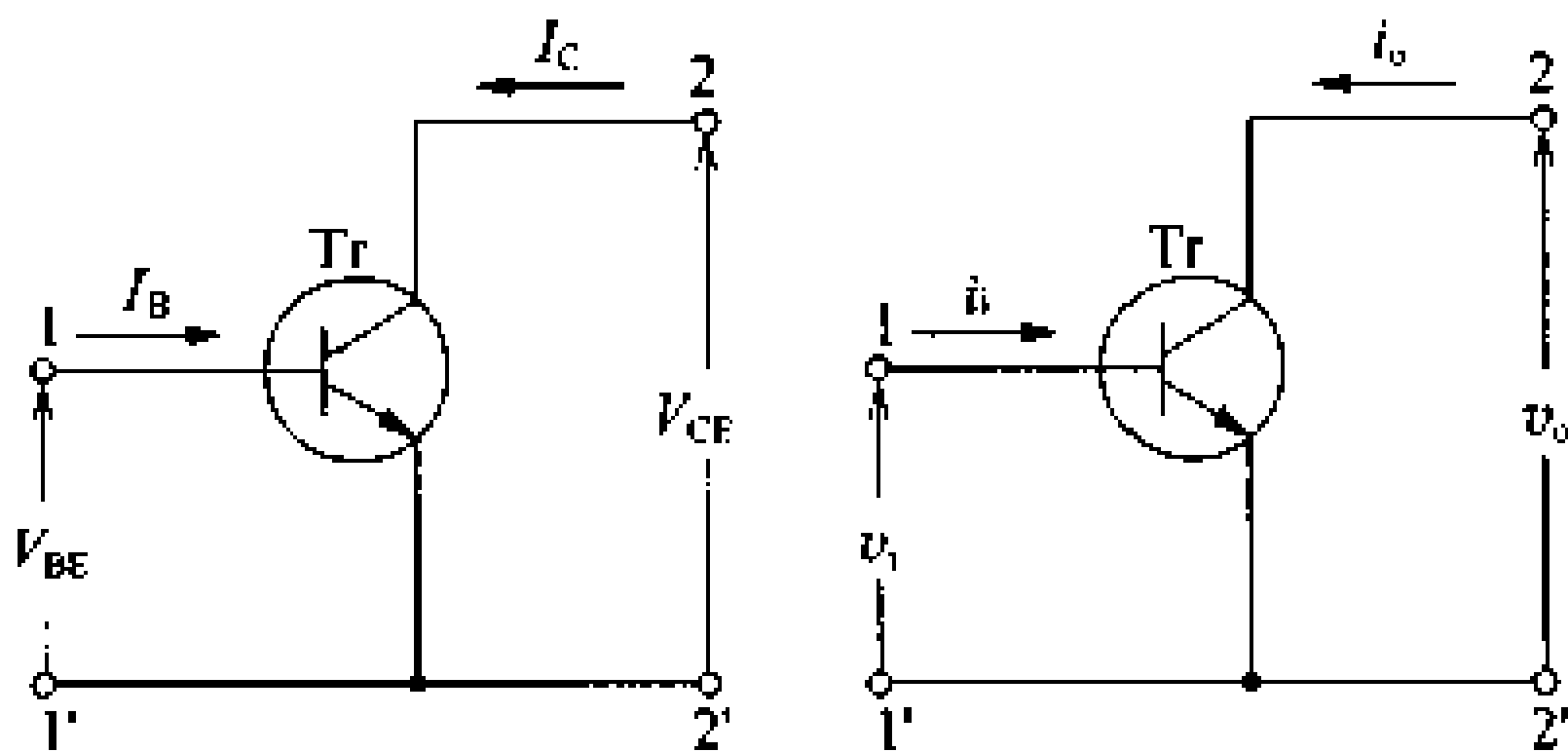
小信号电流放大系数  
输入阻抗  
输出导纳  
电压反馈系数

在式(3.18)中, $h_{ie}$ 为小信号电流放大系数, $h_{ie}$ 为输入阻抗, $h_{oe}$ 为输出导纳, $h_{re}$ 为电压反馈系数。

如果采用  $h$  参数来表示图 3.16(b)所示的晶体管交流工作的电压和电流关系,即

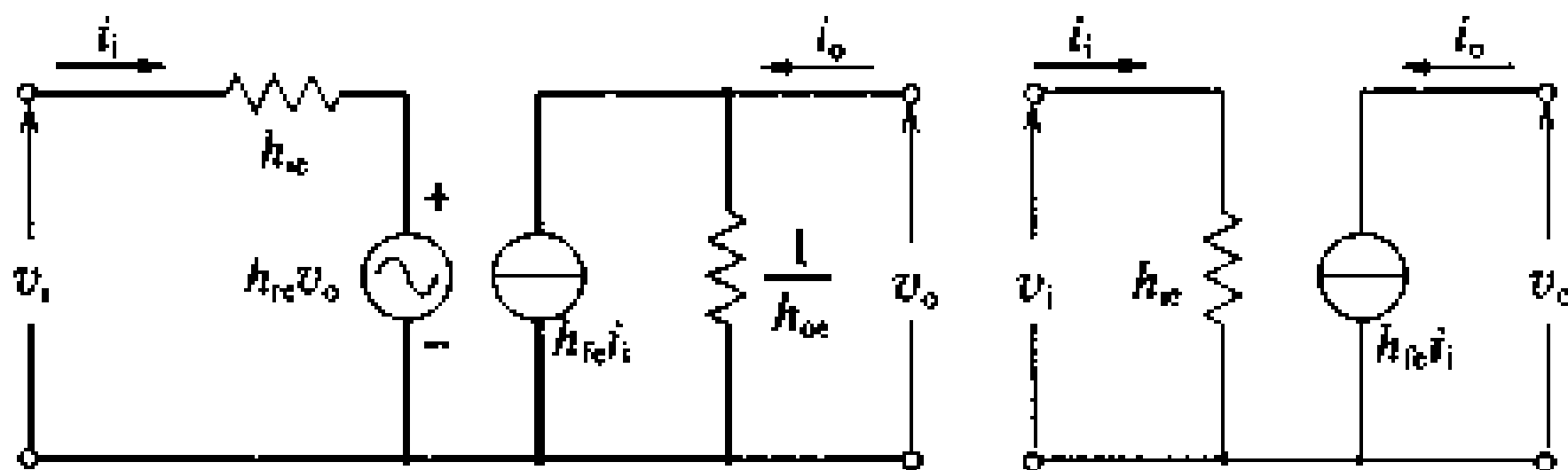
$$v_i = h_{ie} i_i + h_{re} v_o, \quad i_o = h_{fe} i_i + h_{oe} v_o \tag{3.19}$$

从式(3.19)可得到如图 3.17(a)所示那样的晶体管的等效电路。



(a) 直流工作的电压与电流      (b) 交流工作的电压与电流

图 3.16 晶体管电路



(a) 晶体管的等效电路      (b) 简化的等效电路

图 3.17 由  $h$  参数而得到的等效电路

这里,  $h_{re} v_o$  表示电压源的电压,  $h_{fe} i_i$  表示电流源的电流。  
 $1/h_{oe}$  意味着输出阻抗。

一般情况下,  $h_{re}$  非常小,  $1/h_{oe}$  比负载电阻大得很多, 所以, 当忽略这两个参数时, 就能够采用图 3.17(b)所示的简化等效电路。

图 3.18(a)所示基本放大电路的简化等效电路为图 3.18(b)。如果用这个等效电路求各放大系数和输出阻抗, 那么, 其式如(3.20)所示。

电流放大系数  $A_i = \left| \frac{i_o}{i_i} \right| = \frac{h_{fe} i_i}{i_i} = h_{fe}$

电压放大系数  $A_v = \left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \frac{i_o R_L}{v_i} = \frac{h_{fe} i_i R_L}{h_{ie} i_i} = \frac{h_{fe} R_L}{h_{ie}}$



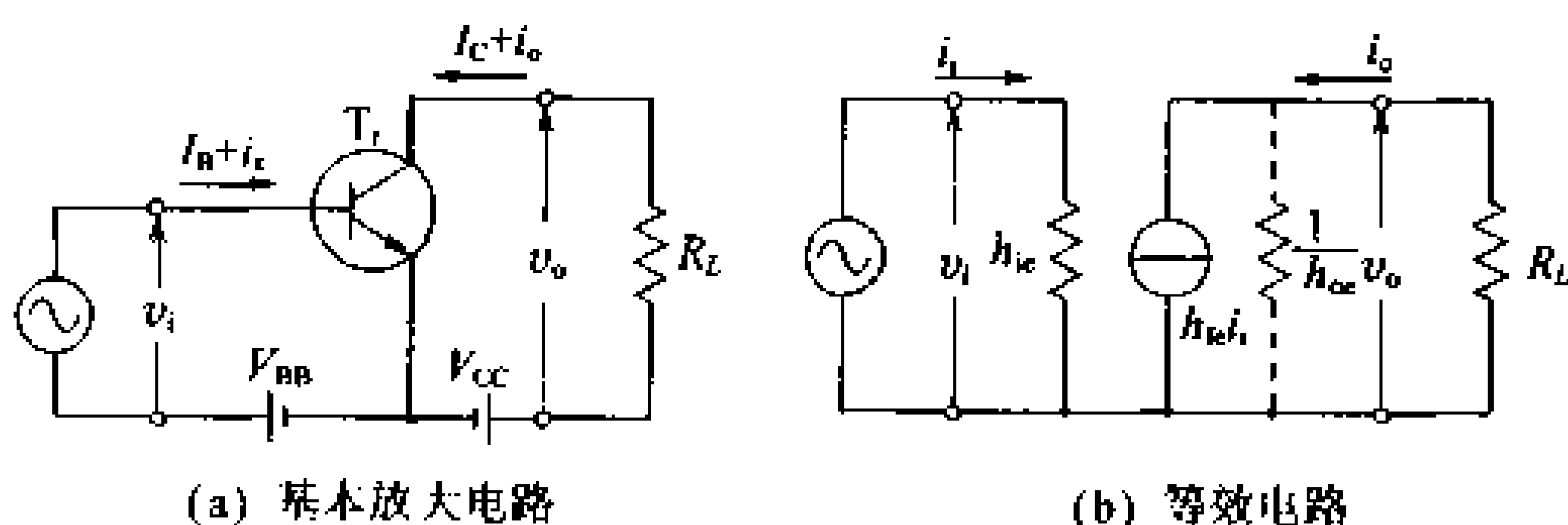


图 3.18 放大电路和等效电路

$$\text{功率放大系数 } A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{i_o^2 R_L}{i_i^2 h_{ie}} = \frac{h_{fe}^2 R_L}{h_{ie}} = A_v A_i \quad (3.20)$$

$$\text{输入阻抗 } R_i = \frac{v_i}{i_i} = h_{ie} [\Omega]$$

$$\text{输出阻抗 } R_o = \frac{1}{h_{oe}} [\Omega]$$

### □ 相关知识 ● 放大系数和增益

将用常用对数表示电路的输出功率和输入功率之比的单位称作贝尔(B), 称贝尔的 1/10 为分贝(dB)。

电压、电流和功率的放大率的大小, 是用叫作分贝的的单位来表示, 并将各放大率的大小称作增益, 其式如下:

增益

$$\text{电压增益 } G_v = 20 \lg A_v [\text{dB}]$$

$$\text{电流增益 } G_i = 20 \lg A_i [\text{dB}] \quad (3.21)$$

$$\text{功率增益 } G_p = 10 \lg A_p [\text{dB}]$$

假定各放大电路的放大倍数为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ , 而各增益为  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ , 那么, 从上式可知多级放大电路的总放大倍数  $A_o$  和总增益  $G_o$  可用下式表示:

$$A_o = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3, \quad G_o = G_1 + G_2 + G_3 [\text{dB}] \quad (3.22)$$

### ■ 例 题 关于放大倍数和输出阻抗的问题

在图 3.19(a) 的基本放大电路中, 晶体管 2SC828 的  $h$  参数值是:  $h_{ie} = 220$ ,  $h_{ie} = 3.6 \text{ k}\Omega$ ,  $h_{oe} = 0.4 \times 10^{-4}$ ,  $h_{oe} = 20 \mu\text{S}$ 。试求负载电阻  $R_L$  为  $4 \text{ k}\Omega$  时的各放大倍数和各增益。同时再求出输入输出阻抗。

这里, 因为  $h_{oe}$  值非常小,  $1/h_{oe}$  值比  $R_L$  大得很多, 所以当忽略这些时, 其等效电路就是图 3.19(b)。

**答**

从图 3.19(b) 得交流等效电路, 如果求各放大倍数和各增益, 就可得到如下各值:

$$\text{电流放大倍数 } A_i = h_{fe} = 220$$

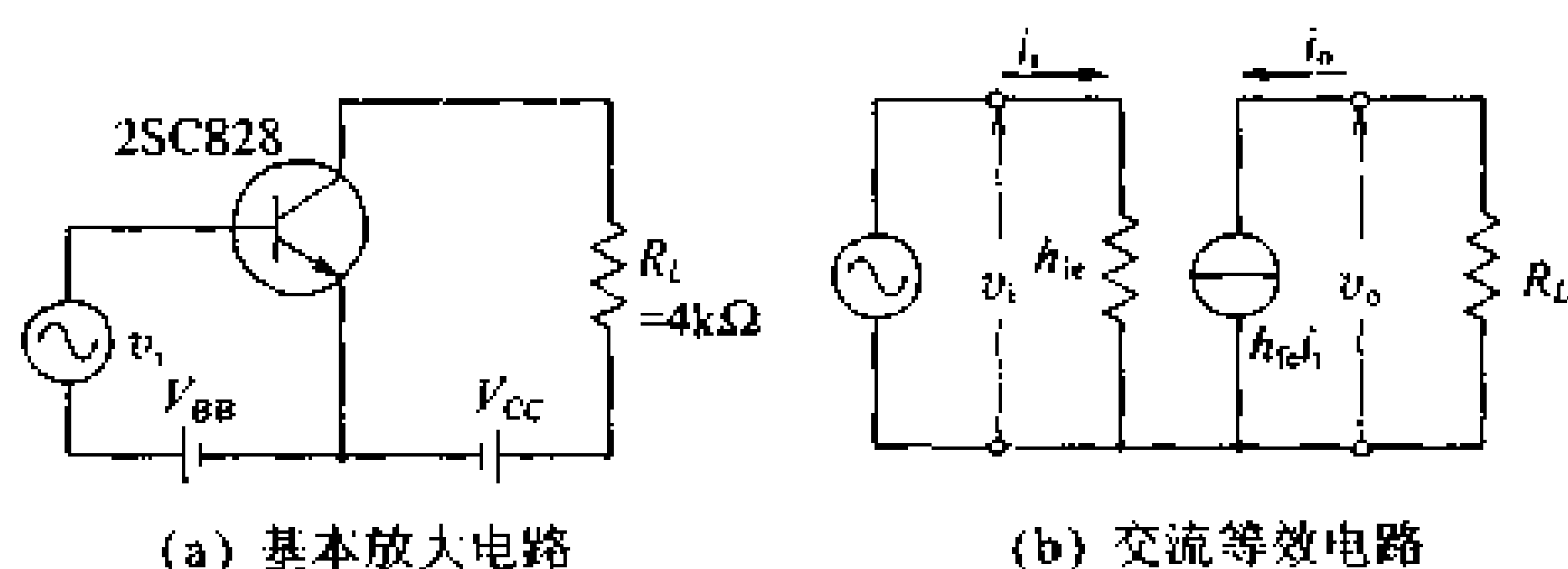


图 3.19 放大电路的工作

电流增益  $G_i = 20 \lg A_i = 20 \lg 220 \approx 20 \times 2.34 \approx 47 \text{ dB}$

电压放大倍数  $A_v = \frac{h_{fe} R_L}{h_{ie}} = \frac{220 \times 4 \times 10^3}{3.6 \times 10^3} \approx 240$

电压增益  $G_v = 20 \lg A_v = 20 \lg 240 \approx 48 \text{ dB}$

功率放大倍数  $A_p = A_v \cdot A_i = 240 \times 220 \approx 53700$

功率增益  $G_p = 10 \lg A_p = 10 \lg 53700 \approx 47 \text{ dB}$

又, 输出输入阻抗如下:

输入阻抗  $R_i = h_{ie} = 3.6 \times 10^3 \approx 3.6 \text{ k}\Omega$

输出阻抗  $R_o = \frac{1}{h_{oe}} = \frac{1}{20 \times 10^{-6}} = 50 \text{ k}\Omega$

请记住如下对数值: 为了进行增益计算, 用对数表和 dB 表也就可以了。对数计算如用函数台式计算机计算, 那就太方便了。可是, 如果能记住如下典型值, 那么, 利用对数的性质, 就可以简化对数值的求值。

记住:  $\lg 2 \approx 0.3$   $\lg 3 \approx 0.48$   $\lg 5 \approx 0.7$   $\lg 7 \approx 0.85$

例如:  $\lg 3500 = \lg(5 \times 7 \times 10^2)$   
 $= \lg 5 + \lg 7 + \lg 10^2$   
 $\approx 0.7 + 0.85 + 2 = 3.55$

## 7 小信号放大电路

### □ 要 点

将与偏压和偏流大小相比而放大振幅的小信号电路称作小信号放大电路。因为用一个晶体管不能得到很大的增益,所以一般采用多级放大电路。在这种多级放大电路中,级间用电容器 $C$ 和电阻器 $R$ 进行耦合,称其为 $RC$ 耦合放大电路。另外,用变压器进行耦合的称其为变压器耦合放大电路。

### □ 解 释 ● 小信号放大电路

图 3.20(a)是 $CR$ 耦合多级放大电路中的 1 级电路。图 3.20(b)是变压器耦合放大电路。

耦合电容器  
旁路电容器

图 3.20(a)的 $RC$ 耦合放大电路和基本放大电路不同的地方是接入了耦合电容器 $C_1$ 、 $C_2$ (起阻止直流的作用)和旁路电容器 $C_E$ (起只让交流部分通过的作用)。另外, $R_i$ 表示下一级电路的输入阻抗。 $RC$ 耦合放大电路,如果是多级连接进行放大,这时有由于输入阻抗不匹配而造成每一级的功率增益下降的缺点。不过,与变压器耦合放大电路相比,因为频率特性的频带宽,所以,一般情况下常被采用。

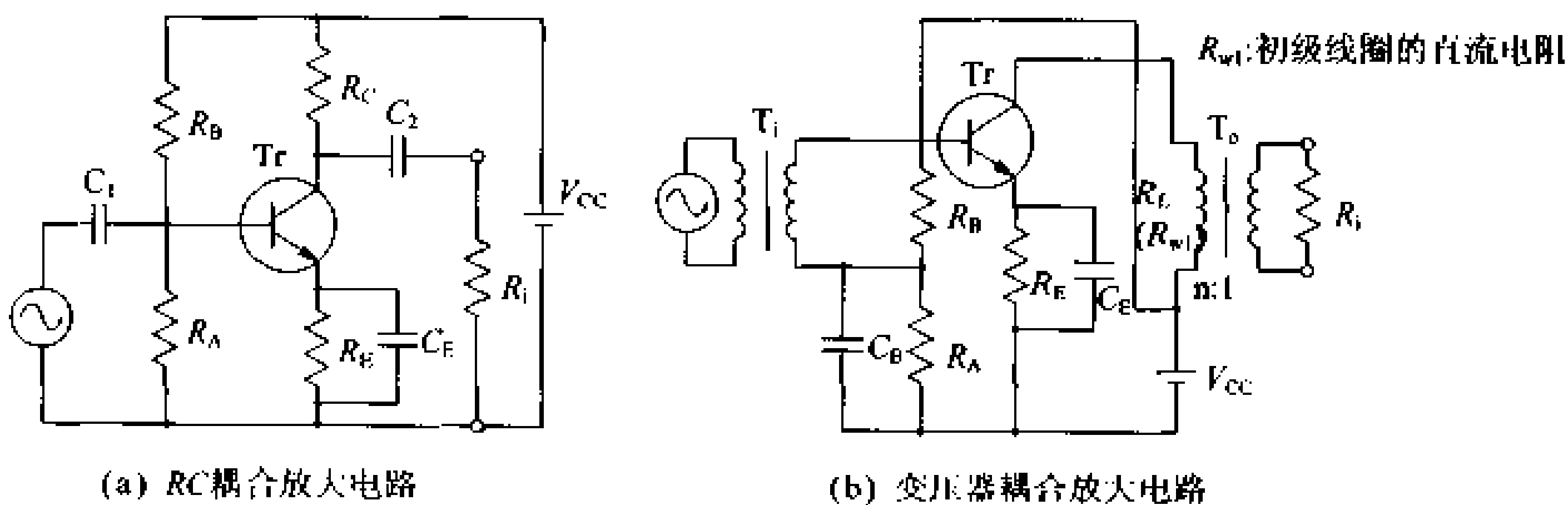


图 3.20 小信号放大电路

这个电路中,晶体管的直流负载电阻是 $R_C + R_E$ ,交流负载电阻可用下式表示:

$$R_L = \frac{R_C R_i}{R_C + R_i}$$

图 3.20(b)的变压器耦合放大电路,因为采用变压器,所以,可得到阻抗的匹配,且直流电流不流过负载。因此,可以有效地利

用电源电压,并能用低的电源电压得到大的输入功率。

相关知识 ● RC 耦合和变压器耦合的动态特性

图 3.21(a)是 RC 耦合放大电路的动态特性,而图 3.21(b)是变压器耦合放大电路的动态特性。

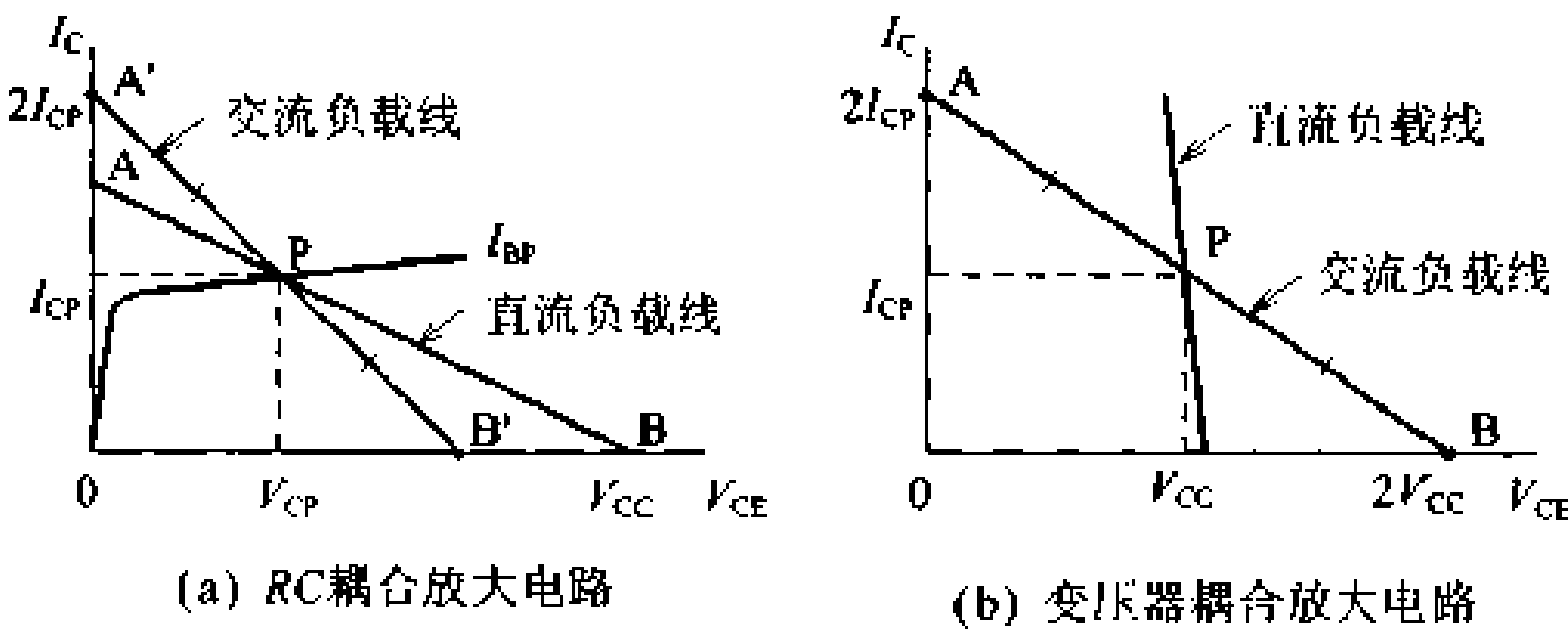


图 3.21 动态特性

交流负载线

图 3.21(a)的工作点 P 可按如下方法求得:在特性曲线上按直流负载画一条直流负载线 AB,然后再按交流负载画一条交流负载线 A'B',两线的交点即为工作点,一般情况下,工作点应在交流负载的 2 等分点上。其次,变压器耦合放大电路的直流负载是  $R_F + R_{w1}$ ,交流负载是  $R_L = n^2 R_L$ 。因为  $R_F + R_{w1} \ll R_L$ ,所以,如同图 3.21(b)所示,工作点几乎处在与电源电压  $V_{cc}$  的垂直线上。

● 频率特性

带宽

低频截止频率

高频截止频率

RC 耦合放大电路的频率特性与变压器耦合放大电路相比,虽然中频增益小,可是,带宽较宽。通常将增益比中频段增益低 3dB 的频率  $f_{cl}$ 、 $f_{ch}$  分别称为低频截止频率和高频截止频率。将  $f_{ch} - f_{cl} = B$  称为带宽。频率低于或高于截止频率,增益都会下降。

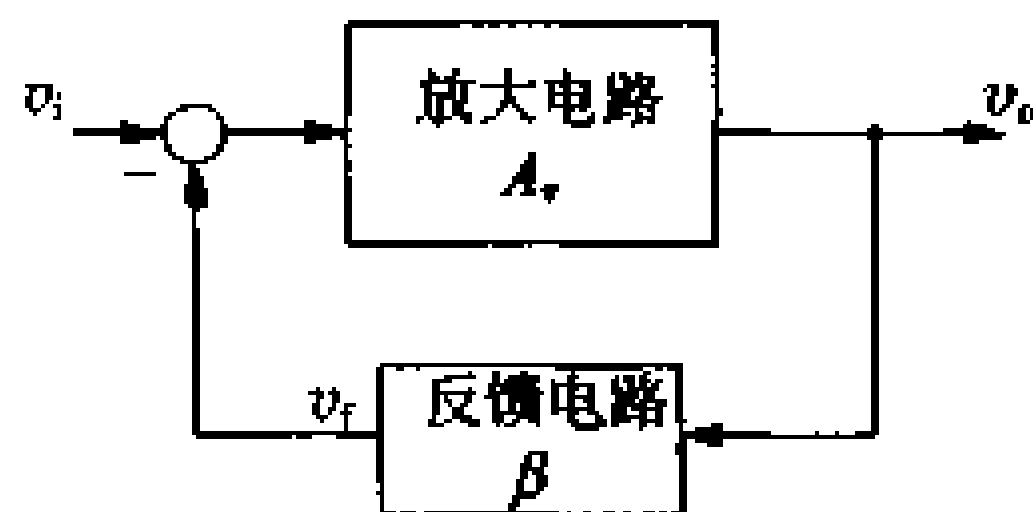
在 RC 耦合放大电路里,低频增益下降的原因是由于受到耦合电容和旁路电容的影响,而高频增益下降的原因是由于受到  $h_{fe}$  的减小和集电极与发射极之间的输出电容以及配线间的分布电容等影响。而在变压器耦合放大电路里,如果频率降低,变压器阻抗就减小,于是增益下降。如果频率增高,变压器绕线间的分布电容的影响就变大,增益也会下降。

## 8 负反馈放大电路

### □ 要点

一般的放大电路常有波形失真和噪声以及增益随温度变化等问题。为此,常将放大器输出的一部分按照使输入电压减小的方向(即反馈电压和输入电压反向)反馈回输入端,从而改善放大器输出特性,称这类放大电路为负反馈放大电路。负反馈的优点:①能改善放大电路增益的稳定性,使之不受温度和电源电压变化的影响;②可减少放大电路内部的失真和噪声;③加宽了频率特性的带宽等。但也有增益下降和改变了输入输出阻抗的缺点。

### □ 解释 ● 负反馈放大电路的原理



反馈系数

图 3.22 是负反馈放大电路的原理图。 $A_v$  是不加负反馈时的放大倍数, $\beta$  是反馈电路的反馈系数(反馈电压和输出电压之比)。

首先,不加负反馈时的输出电压  $v_o$  可用下式表示:

$$v_o = A_v v_i \quad (3.23)$$

其次,加了负反馈时的输出电压  $v_o$  可用下式表示:

$$v_o = A_v (v_i - v_f) = A_v (v_i - \beta v_o) \quad (3.24)$$

因此,负反馈放大电路的电压放大倍数  $A_{vf}$  可表示为

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_v}{1 + A_v \beta} \quad (3.25)$$

环路增益  
反馈量

称式(3.25)中的  $A_v \beta$  为环路增益, $1 + A_v \beta$  表示反馈量。如果增大环路增益,当  $A_v \beta \gg 1$  时, $A_{vf}$  就只决定于  $\beta$ ,如下式所示:

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + A_v \beta} \approx \frac{A_v}{A_v \beta} = \frac{1}{\beta} \quad (3.26)$$

也就是说, $A_{vf}$  变得与没有负反馈时的放大倍数没有关系。所以, $A_{vf}$  就不受晶体管和电路元件的老化或特性变化的影响。总的增益只由反馈电路的特性决定。如果在反馈电路里采用电阻元件,那么,能够改善频率特性。

### □ 相关知识 ● 电流反馈电路和电压反馈电路

负反馈的方式根据从输出端取出反馈电压时是串联还是并联;和把反馈电压加到输入端上时是串联还是并联,在原理上共有

电流反馈电路

电压反馈电路

四种。

图 3. 23(a) 是 **电流反馈电路** (输出和输入都采用串联的电路)。同图 3. 23(b) 是 **电压反馈电路** (输出采用并联而输入采用串联的电路)。

图 3. 23(a) 的电路可以认为是将偏压电路里使用的电容器去掉的电路。

当输入信号向正方向增大时, 反馈电阻  $R_F$  上流过图示方向电流  $i_e$ , 该电流在  $R_F$  上的电压减小, 其效果是使输入电压相位相反, 它使发射极和基极之间的电压减小, 其效果是使输入信号变小, 这就是说, 加强负反馈后放大倍数变小了。称这种反馈电压  $v_f = R_F i_e$  和流过负载  $R_L$  的交流电流  $i_e$  成正比的反馈为 **电流反馈**。

图 3. 23(b) 的电路是在两级放大电路里通过反馈阻抗将输出电压的一部分以负反馈形式加到输入端的例子。如果  $Tr_1$  的输入电压正向增加, 那么, 在  $Tr_1$  的集电极负载  $R_{C1}$  上就产生如图示方向的电压降,  $Tr_2$  的输入电流就向着负方向减少。因此, 在  $Tr_2$  的集电极负载  $R_{C2}$  上就产生了图示极性的电压。该电压的一部分通过由  $R_F$  和  $C_F$  所构成的反馈电路反馈到  $Tr_1$  的发射极上, 发射极电阻  $R_E$  的两端出现图示极性的电压。因为这个反馈电压和输入电压相位相反, 所以这是加了负反馈。称这种反馈电压与负载  $R_{C2}$  上产生的电压成正比的反馈为 **电压反馈**。

电流反馈

电压反馈

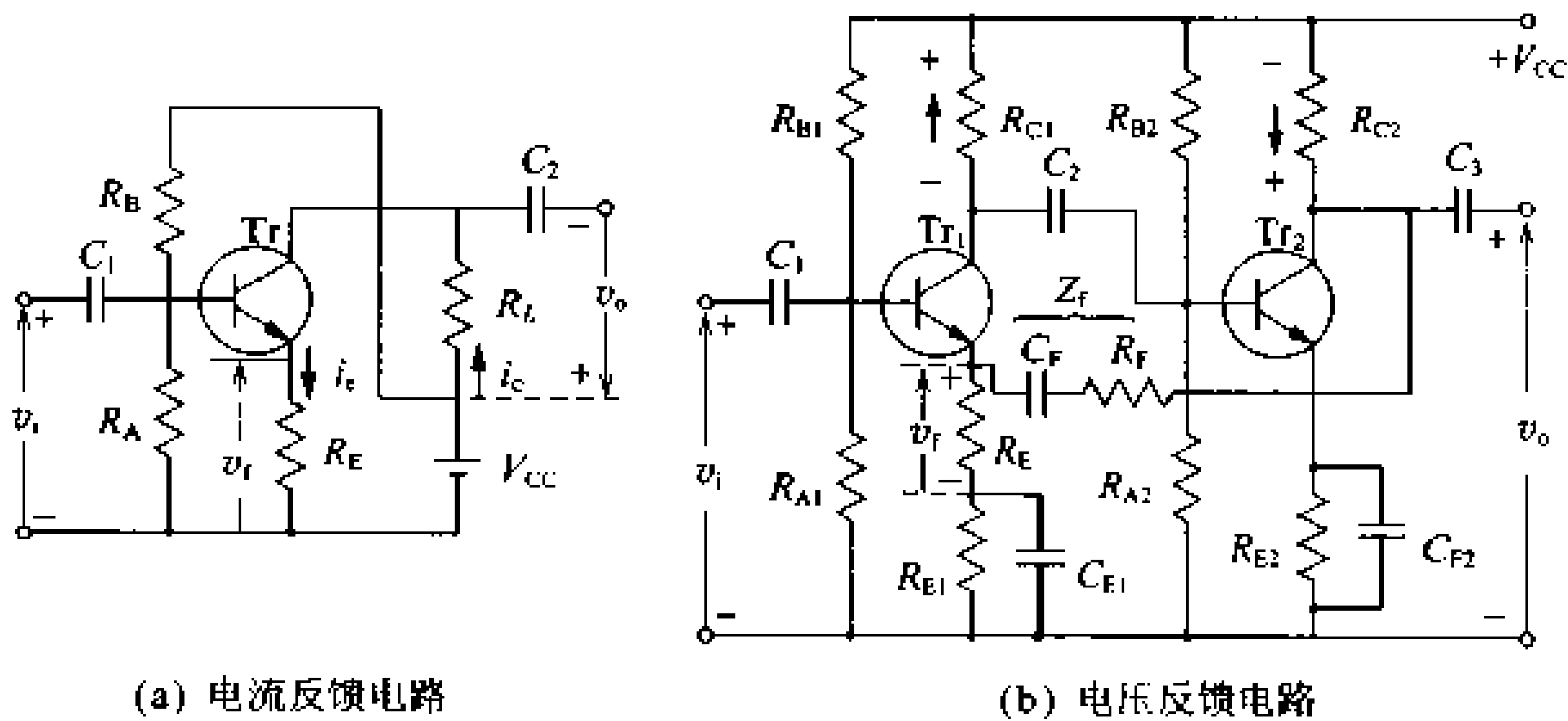


图 3. 23 负反馈放大电路

● 电流反馈电路的电压放大倍数和输入阻抗

图 3. 24(a) 所示那样的电流反馈电路, 没有反馈时的电压放大倍数  $A_v$  可表示为

$$A_v = \frac{h_{fe} R_L}{h_{ie}} \tag{3. 27}$$

有反馈时的电压放大倍数  $A_{vf}$ , 如果  $i_e \approx i_c$ , 因为  $\beta = R_E/R_L$ , 所以,  $A_{vf}$  可表示为

$$A_{vf} = \frac{h_{fe} R_L}{h_{ie} + h_{fe} R_E} \quad (3.28)$$

比较式(3.27)和式(3.28)可以看到, 加了反馈后的输入阻抗是在没有反馈时的  $h_{ie}$  上再加上  $h_{fe} R_E$ , 可表示为

$$R_i = h_{ie} + h_{fe} R_E = h_{ie} (1 + A_{vf} \beta) \quad (3.29)$$

#### 高输入阻抗电路

这种电路适合于作为高输入阻抗电路使用。这时, 图 3.24(a) 的等效电路为图 3.24(b) 所示那样。

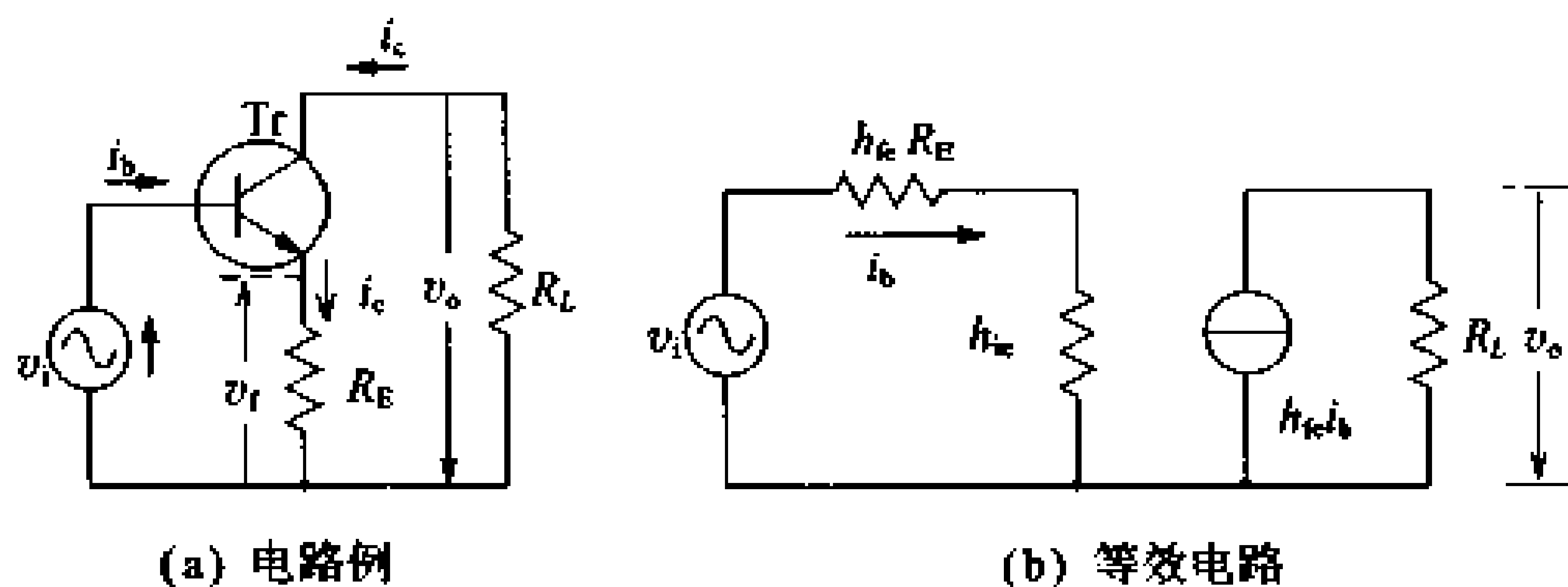


图 3.24 电流反馈电路

#### ● 电压反馈电路的电压放大倍数和输入阻抗

在图 3.25 所示那样的电压反馈电路里, 如果  $R_F \gg R_E$ ,  $R_F \gg R_{C2}$ , 那么, 反馈系数  $\beta$  就可表示为

$$\beta = \frac{R_E}{R_E + R_F} \approx \frac{R_E}{R_F} \quad (3.30)$$

因此, 如令没有反馈时的总电压放大倍数为  $A_v$ , 那么, 加了负反馈时的电压放大倍数  $A_{vf}$  可表示为

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + A_v \beta} = \frac{A_v}{1 + A_v \frac{R_E}{R_F}} \quad (3.31)$$

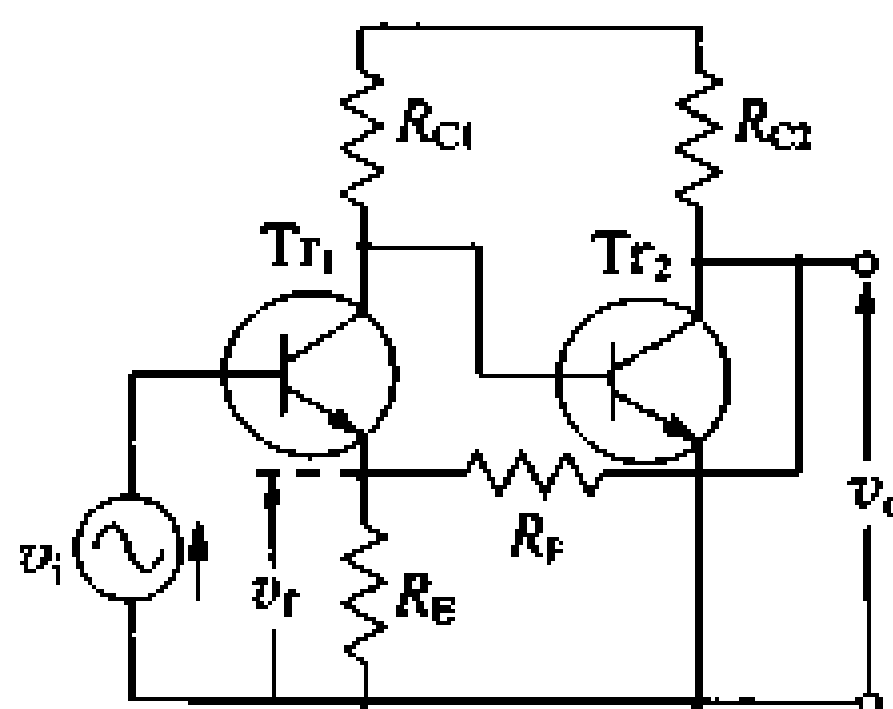


图 3.25 电压反馈电路

另外,令  $\text{Tr}_1$  的  $h$  参数为  $h_{ie1}$  和  $h_{ie1}$ ,那么,输入阻抗  $R_i$  可表示为

$$R_i = (1 + A_v \beta)(h_{ie1} + h_{ie1} R_E) \quad (3.32)$$

### 例 题 3.26 关于电压放大倍数和输入阻抗的问题

在图 3.26(a)所示的  $RC$  耦合放大电路里,试求去掉  $C_E$  后的电压放大倍数和输入阻抗。这里假定晶体管的  $h$  参数为  $h_{ie} = 4\text{k}\Omega$ ,  $h_{fe} = 120$ 。

**答]** 图 3.26(b)所示等效电路中,  $R_C$  和  $R'_i$  的并联合成电阻  $R_L$  为

$$R_L = \frac{R_C R'_i}{R_C + R'_i} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2\text{ k}\Omega$$

因此,电压放大倍数  $A_{vf}$ :

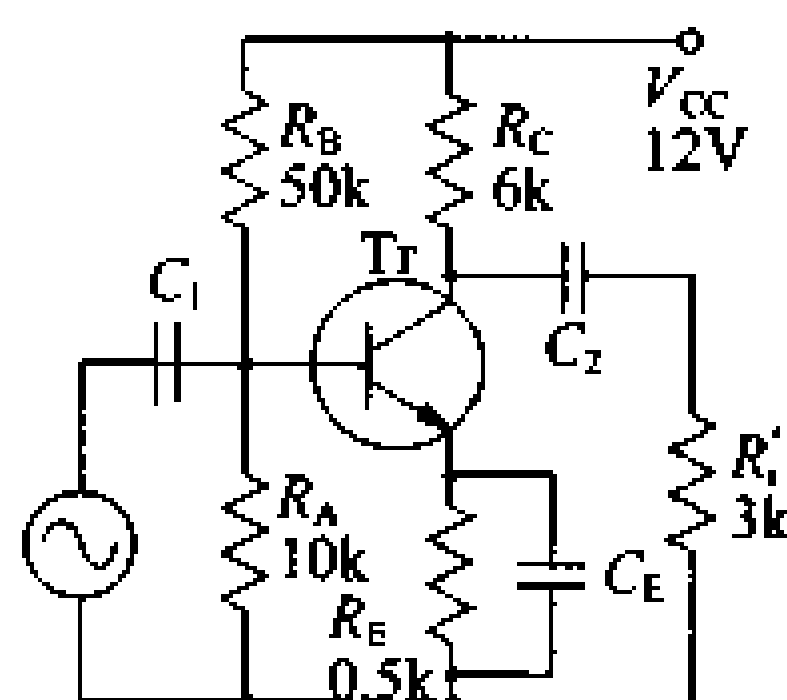
$$A_{vf} = \frac{h_{fe} R_L}{h_{ie} + h_{fe} R_E} = \frac{120 \times 2}{4 + 120 \times 0.5} \approx 3.8$$

其次,从基极看到的输入阻抗  $R_i$  为

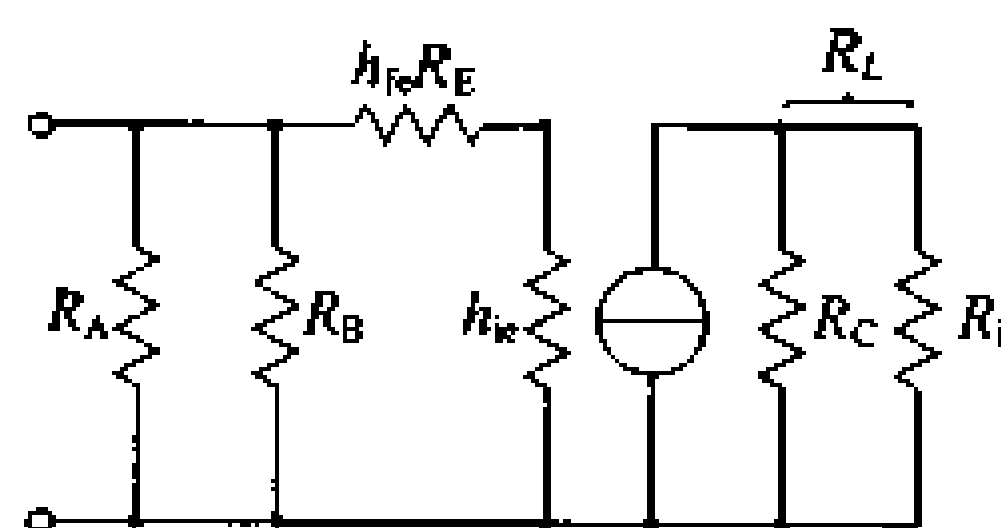
$$R_i = h_{ie} + h_{fe} R_E = 4 + 120 \times 0.5 = 64\text{ k}\Omega$$

由于  $R_A$  与  $R_B$  和  $R_i$  并联,因此,从输入端看到的输入阻抗  $R_{if}$  为

$$R_{if} = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_i}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{50} + \frac{1}{64}} \approx 7.4\text{ k}\Omega$$



(a)  $RC$  耦合放大电路



(b) 等效电路

图 3.26 串联反馈电路



## 9 功率放大电路

### □ 要点

在晶体管放大电路中,特将对负载(如扬声器等)提供大信号功率的电路称为功率放大电路。功率放大电路根据工作点取法的不同,有 A 类功率放大电路和 B 类 PP(推挽)功率放大电路(DEPP 电路)等。在和负载耦合方面也有使用变压器(输出变压器)的。可是,输出变压器在波形失真和频率特性方面存在问题。为此,一般不用输出变压器,而常常使用能够直接驱动负载的 SEPP 电路。

### □ 解释 ● 功率放大电路的原理

A 类放大电路  
B 类放大电路

采用输出变压器的 A 类放大电路,它的直流功率损耗大,电源效率也低,大约是 50% 左右。另外, B 类放大电路因为只在信号输入时,有集电极电流,所以,电源效率比 A 类放大电路好。但是,在 B 类放大的情况下,一个晶体管只能得到正弦波的半个周期,且波形有失真。故要如图 3.27(a)所示那样,再用一个晶体管来放大余下的那半个周期,从而得到没有失真的正弦波输出。这就是 B 类 PP 功率放大电路,它的电源效率非常高,约为 78% 左右。图 3.27(b)是该电路的动态特性。

B 类 PP 功率  
放大电路

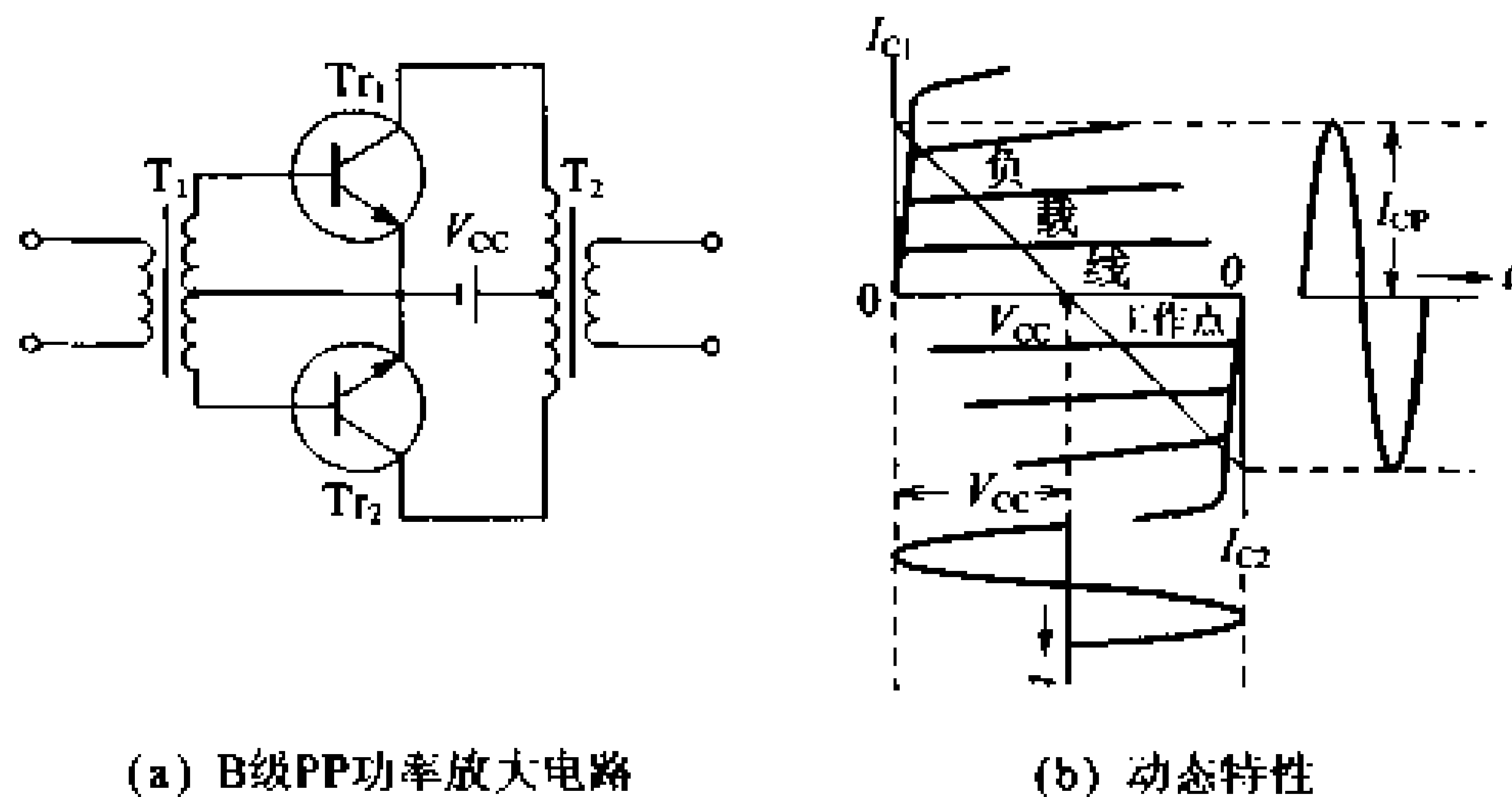


图 3.27 DEPP 电路

### SEPP 电路

图 3.28 是 SEPP 电路的原理图。SEPP 电路是一种由特性相同的 pnp 型和 npn 型晶体管互补连接而成的功率放大电路。因为二个晶体管的极性是相反的,所以只要把输入端并联连接,就能按输入正弦波的正半周和负半周交替工作(推挽工作)。这个电路的



## 10 高频放大电路

### □ 要点

只在某特定频率范围内进行选择性地放大的高频信号放大中,其负载常采用调谐电路。将放大器带宽窄的电路称为窄带放大电路,常用在收音机等设备里。与此相对应,将频带宽的放大电路称为宽带放大电路,常用于电视机、视频设备以及宽带振荡电路等。

### □ 解释

#### ● 高频放大电路的原理

调谐式高频  
放大电路

图 3.31(a)是调谐式高频放大电路的例子。在晶体管输入端和输出端的高频变压器上并联有电容器的谐振电路就是调谐电路,调整两个调谐电路的调谐频率,使之相等。图 3.31(b)是调谐式高频放大电路的特性。如果令调谐电路的好坏程度为  $Q_0$ ,那么,带宽可表示为

$$B = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q_0} \quad (3.34)$$

也就是说,调谐电路的  $Q_0$  越大,带宽越窄,频率特性越尖锐。

通用宽带放大  
电路  
校正法  
特征频率

另一方面,宽带放大电路以往一直采用参差调谐放大器,它是把调谐式高频放大电路进行多级连接,并且将其调谐频率一点一点错开,从而使总体特性得到所需的带宽。现在已采用由 IC 实现的通用宽带放大电路或者采用校正法,在晶体管电路中插入电感线圈来补偿高频增益的下降。

高频放大电路里所用的晶体管需要满足以下条件:

- ① 特征频率  $f_T$  (表示晶体管好坏程度的量)要足够高;
- ② 集电极输出电容(它是引起振荡的原因)值要小。

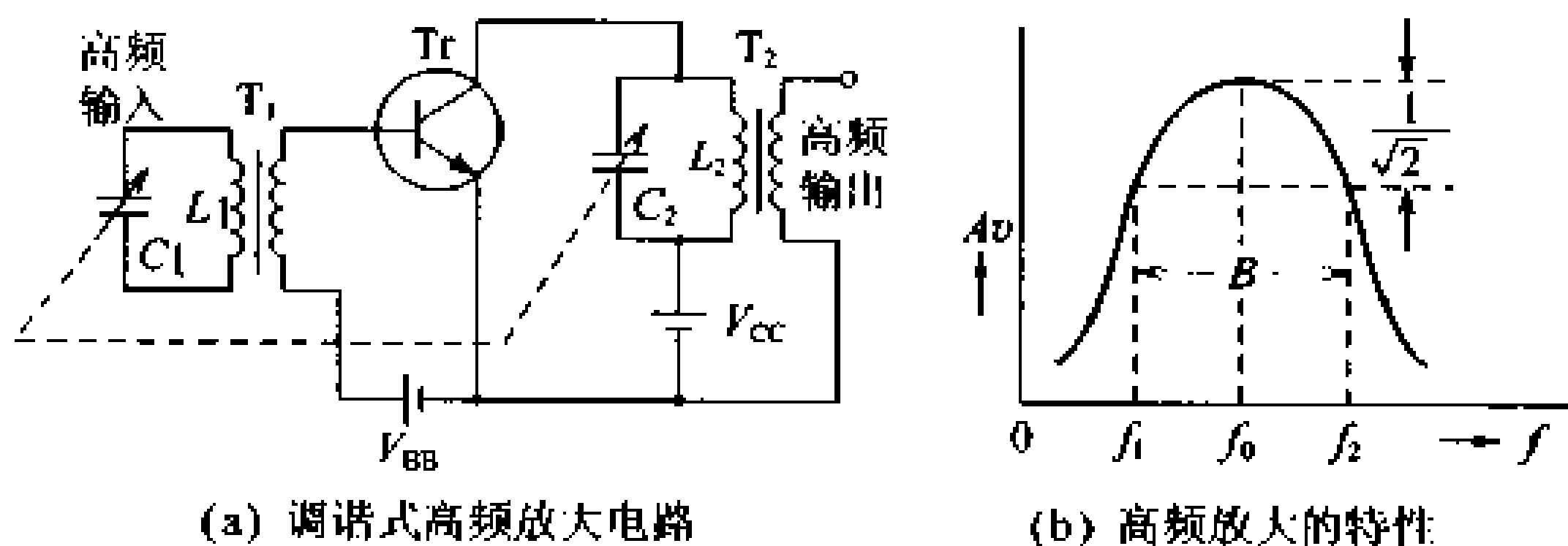


图 3.31 高频放大电路

## □ 相关知识 ● 用变压器中间抽头来改变阻抗

实际的调谐式高频放大电路里,因为晶体管的输出阻抗和负载与调谐电路并联,所以电阻减小,造成调谐电路的  $Q_0$  值下降,因此,不能得到谐振峰尖锐的特性。为了增加调谐电路的并联电阻的等效值,可以像图 3.32 所示那样,在变压器初级设置中间抽头,那么,图示的  $R_0$  和  $R_L$  就可像式(2)那样进行变换。

$$R_0' = n_1^2 R_0, \quad R_L' = n_2^2 R_L \quad (3.35)$$

这里,  $n_1 = N_0/N_1$ 、 $n_2 = N_0/N_2$ 。通过改变变压器的匝数比  $n_1$  和  $n_2$ ,就可改变电阻  $R_0'$  和  $R_L'$ ,从而就能调节  $Q_0$  值和带宽。另外,如忽略变压器线圈的损耗,则阻抗匹配条件可表示为

$$\frac{R_0}{R_L} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (3.36)$$

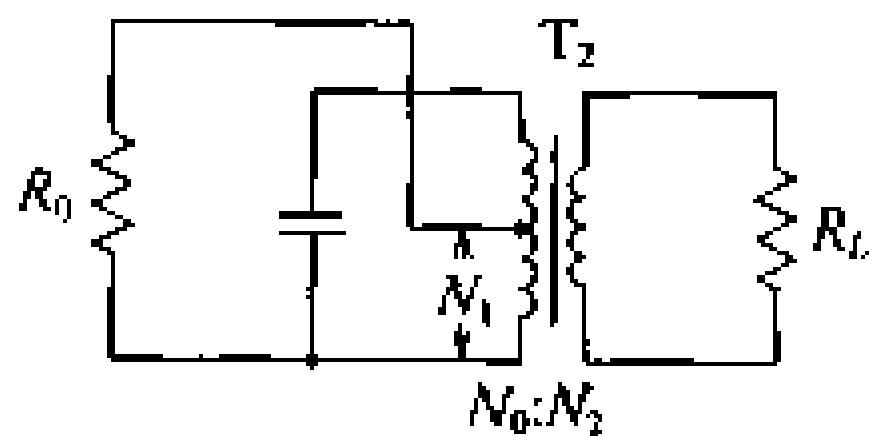


图 3.32 带中间抽头的变压器

## ● 中频放大电路

调幅收音机的中频放大部分的变压器调谐频率是 455kHz。图 3.33 给出了这个中频放大电路的例子。图中的  $IFT_1$ 、 $IFT_2$ 、 $IFT_3$  都是中频变压器。称  $C_N$  为中和电容器,它起到抵消集电极输出电容的作用。

中频放大电路  
中和电容器

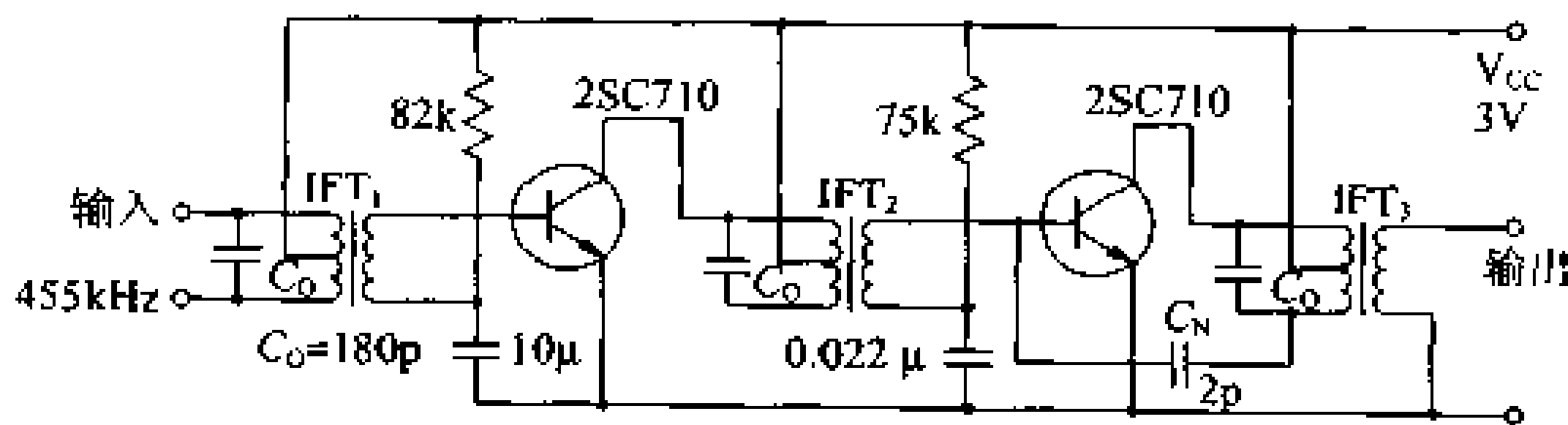


图 3.33 中频放大电路

# 11 FET 放大电路

## □ 要点

与前面介绍的双极性晶体管(电流控制元件)相反,FET 是电压控制元件。FET 有输入阻抗高、噪音小的特点。还有因为它受温度影响小且基极不需要直流电流,所以偏置电路的设计容易,故常常在放大电路的初级和电容器话筒等里使用。此外,也常用于音频录制特性补偿中的均衡电路。

## □ 解释 ● FET 放大电路

源接地

图 3.34(a)是源接地(相当于双极晶体管的发射极接地)的 FET 基本放大电路。 $R_G$  是为了给栅极加偏压的电阻,为了不使输入阻抗减小,电阻值要高。因为基极没有电流,所以  $R_G$  上的压降为 0。因此,源电阻  $R_S$  两端的电压降  $V_S$  就是基极和源极之间的电压  $V_{GS}(-V_S = -I_D R_S)$ 。

假定 FET 的跨导为  $g_m(\Delta I_D/\Delta V_{GS}[S])$ ,输入电阻为  $r_g$ ,输出电阻为  $r_d$ ,因为  $r_g$  非常大,所以电路的输入阻抗就仅仅是  $R_G$ 。因为  $C_1$  和  $C_2$  的阻抗很小,可以忽略不计,所以等效电路如图 3.34(b)所示。

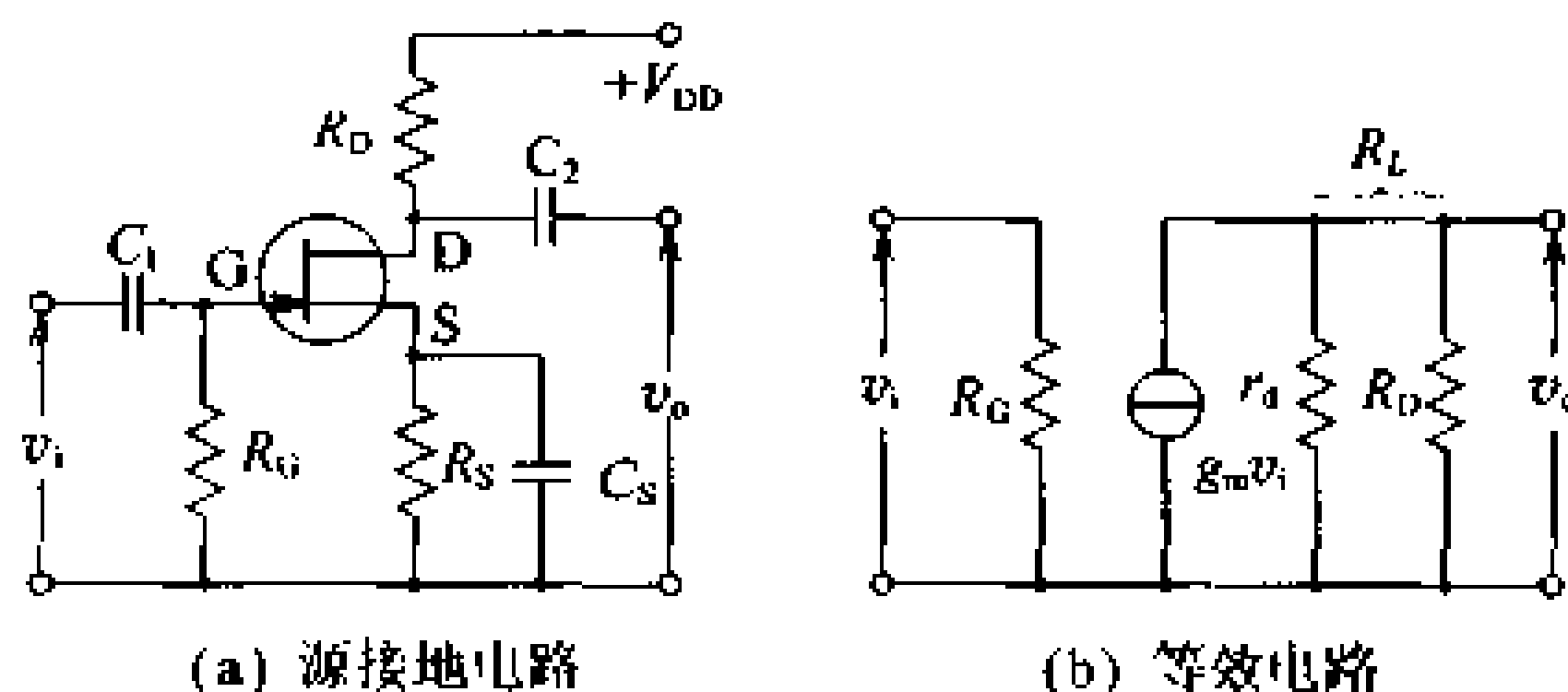


图 3.34 FET 基本放大电路

由图 3.34(b)可知,输出电压  $v_o$  可表示为

$$v_o = g_m v_i R_L \quad (3.37)$$

式中  $R_L = r_d R_D / (r_d + R_D)$ 。另外,电压放大倍数  $A_v$  可表示为

$$A_v = g_m R_L \quad (3.38)$$

## □ 相关知识 ● FET 的接地方式

除了常用的源接地电路外,还有如图 3.35 所示的接地方式。

## 漏极接地电路 栅极接地电路

图 3.35(a)为漏极接地电路,虽然电压增益比 1 小,可是因为输出阻抗小,所以适用于阻抗变换电路。另外,图 3.35(b)的栅极接地电路,因为从输出反馈到输入的电容小,所以,这种电路被使用在高频放大里。

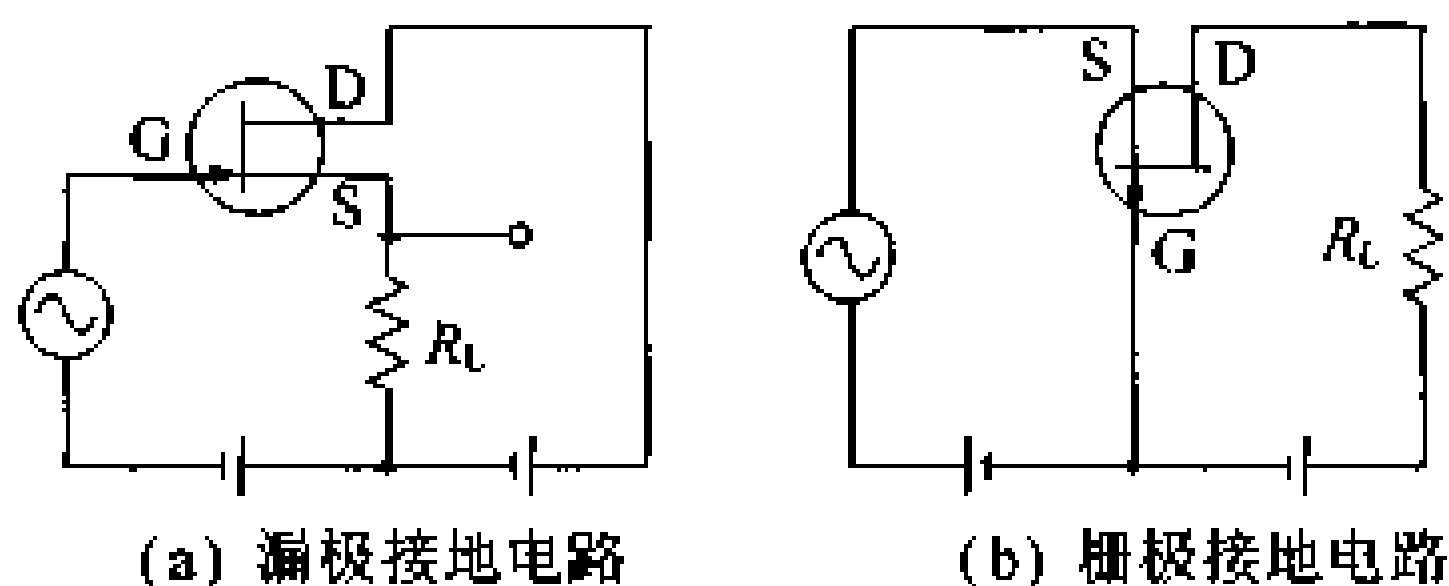


图 3.35 FET 的接地电路

## 应用基础

图 3.36(a)是常使用在磁带录音机和无线话筒里的驻极体电容器麦克风(ECM)用的电路。这个电路采用源极接地电路,将 ECM 的高输出阻抗变换成低输出阻抗(约  $700\Omega$ ),第二级以后都使用双极性晶体管。另外,图 3.36(b)给出了 FET 和双极晶体管相组合的均衡放大电路。这个电路采用了具有所需频率特性的反馈电路,把第二级的输出加到第一级,因为图中所示的  $Z_F$  阻抗随频率增高而减小,所以反馈量随着频率增高而增大,于是,实现了总增益随频率增加而下降的均衡特性。

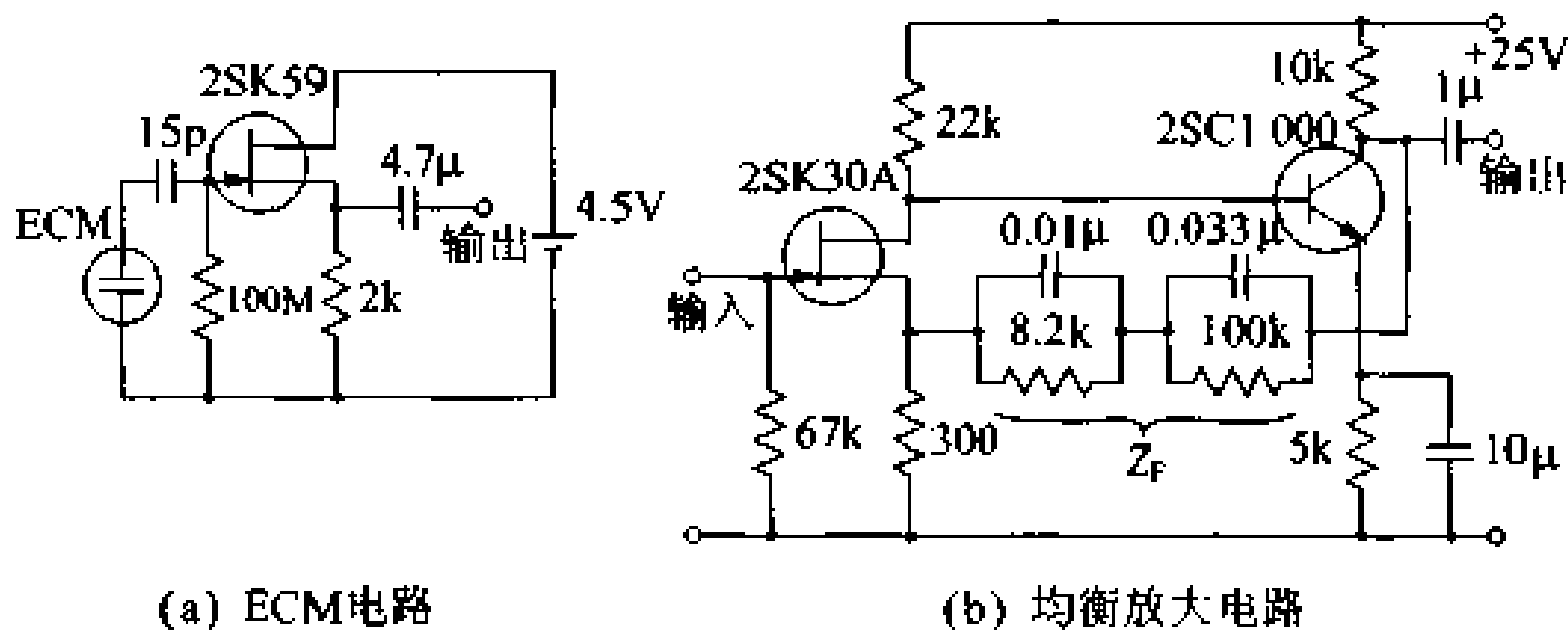


图 3.36 使用 FET 的电路例

## 12 IC 化的放大器 (I)

### □ 要 点

运算放大器是既能放大信号也能进行加法、减法等运算的器件,所以称它为运算放大器。运算放大器具有放大倍数大、输入阻抗高和输出阻抗低等特点。利用这种放大电路能制成反相放大和同相放大等电路,其放大倍数由外加电阻之比来确定。运算放大器现已 IC 化。

称把信号输入到反相输入端而进行放大的放大器为反相放大器,放大倍数由  $R_2/R_1$  给出。称把信号输入到同相输入端而进行放大的放大器为同相放大器。其放大倍数由  $R_2/R_1$  给出。

### □ 解 释 ● 运算放大电路

#### 运算放大器

运算放大器是 Operational amplifier 的简称。因为它能放大信号和进行加法、减法以及微分和积分等运算,所以称它为运算放大器。运算放大器如果与一般的放大器相比,它有如下的特点:

- ① 放大倍数极大(约  $10^4 \sim 10^6$ );
- ② 输入阻抗极高(约数  $10\text{M}\Omega$ );
- ③ 是一个差动放大电路;
- ④ 输出阻抗极小(约  $50\Omega$ )。

#### ● 运算放大器的电路符号

图 3.37 给出了运算放大器的电路符号。运算放大器是具有二个输入端和一个输出端的放大器。一般需要正负二个电源,常使用  $\pm 15\text{V}$ 。

如图 3.38 所示那样,将输入信号加到反相输入端(-),那么,在输出端就得到了和输入相位相反的输出。与此相反,如果在同相输入端(+)加信号,那么,就得到和输入同相的输出信号。

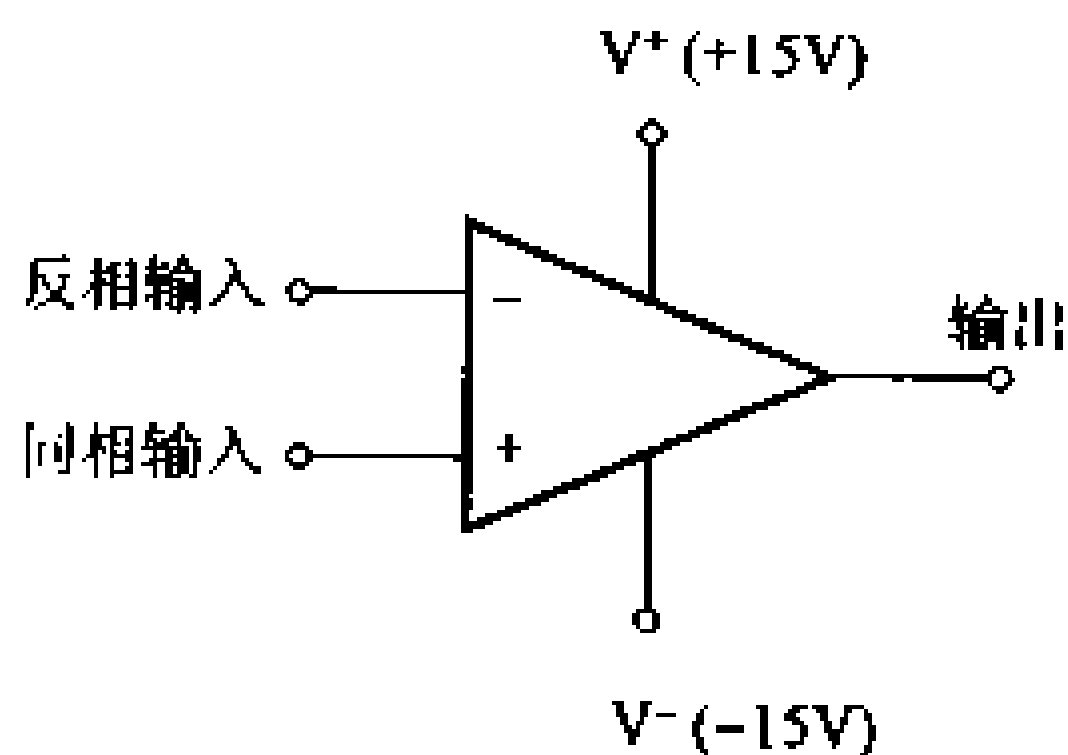


图 3.37 运算放大器的电路符号

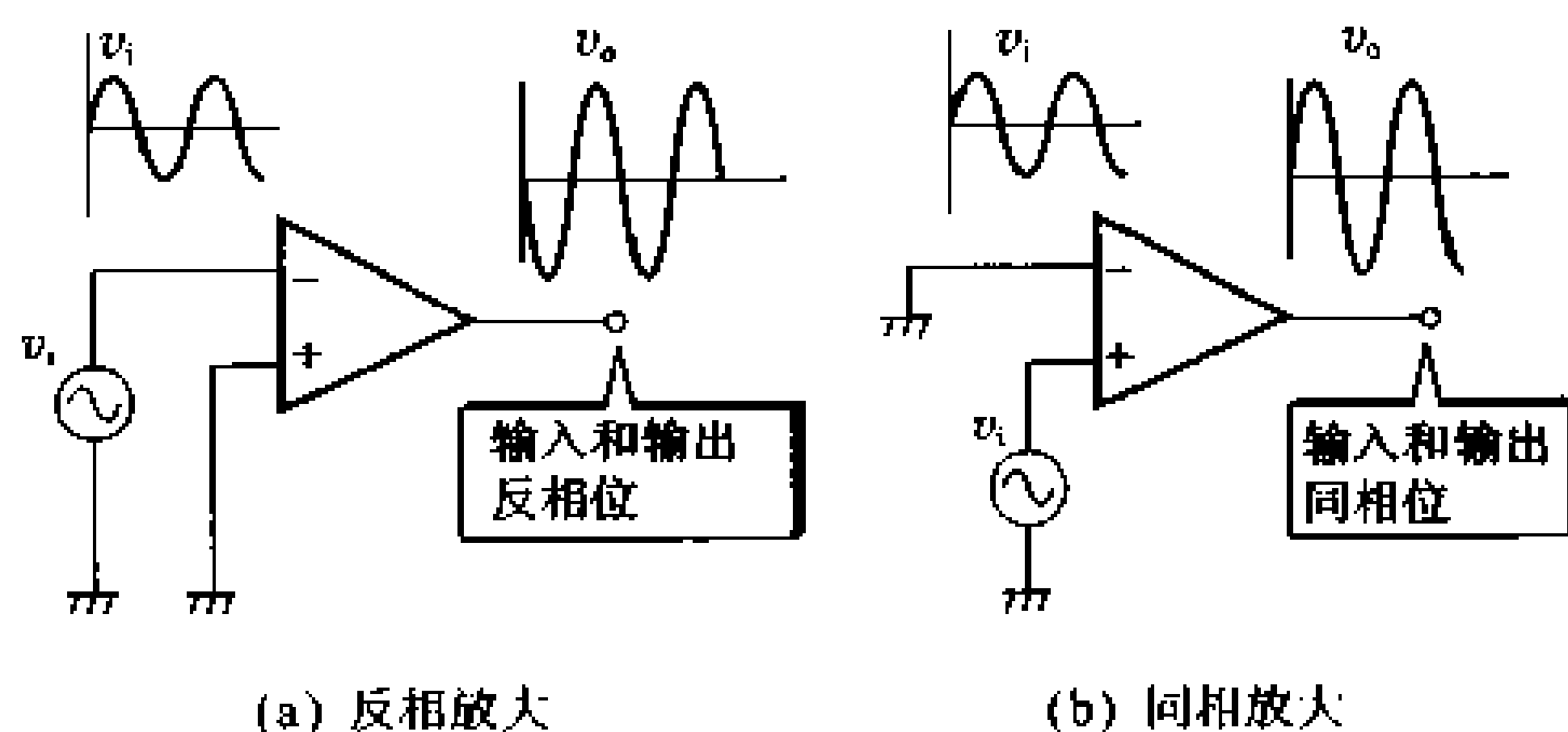


图 3.38 加在各输入端的信号和其输出

## □ 相关知识 ● 反相放大器

在图 3.39 里,如果输入端之间的电压为  $v_s$ ,流过  $R_1$  的电流为  $i_1$ ,流过  $R_2$  的电流为  $i_2$ ,则有

$$i_1 = \frac{v_i - v_s}{R_1} \quad (3.39)$$

$$i_2 = \frac{v_s - v_o}{R_2} = -\frac{v_o - v_s}{R_2} \quad (3.40)$$

因为运算放大器的输入阻抗极大,所以,可以认为输入电流为 0,于是得  $i_2 \approx i_1$ 。另外,如果运算放大器的增益为  $A_o$ ,那么,就得到  $v_o = -A_o \cdot v_s$ ,即  $v_s = -v_o/A_o$ 。如果假定  $A_o$  为无限大,那么  $v_s$  就等于 0。把这种状态称为虚拟短路。如果将  $v_s = 0$  代入式 (3.39) 和式 (3.40),则  $v_i/R_1 = -v_o/R_2$ 。从而有

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.41)$$

也就是说,反相放大器的增益是由外加电阻来决定。

虚拟短路

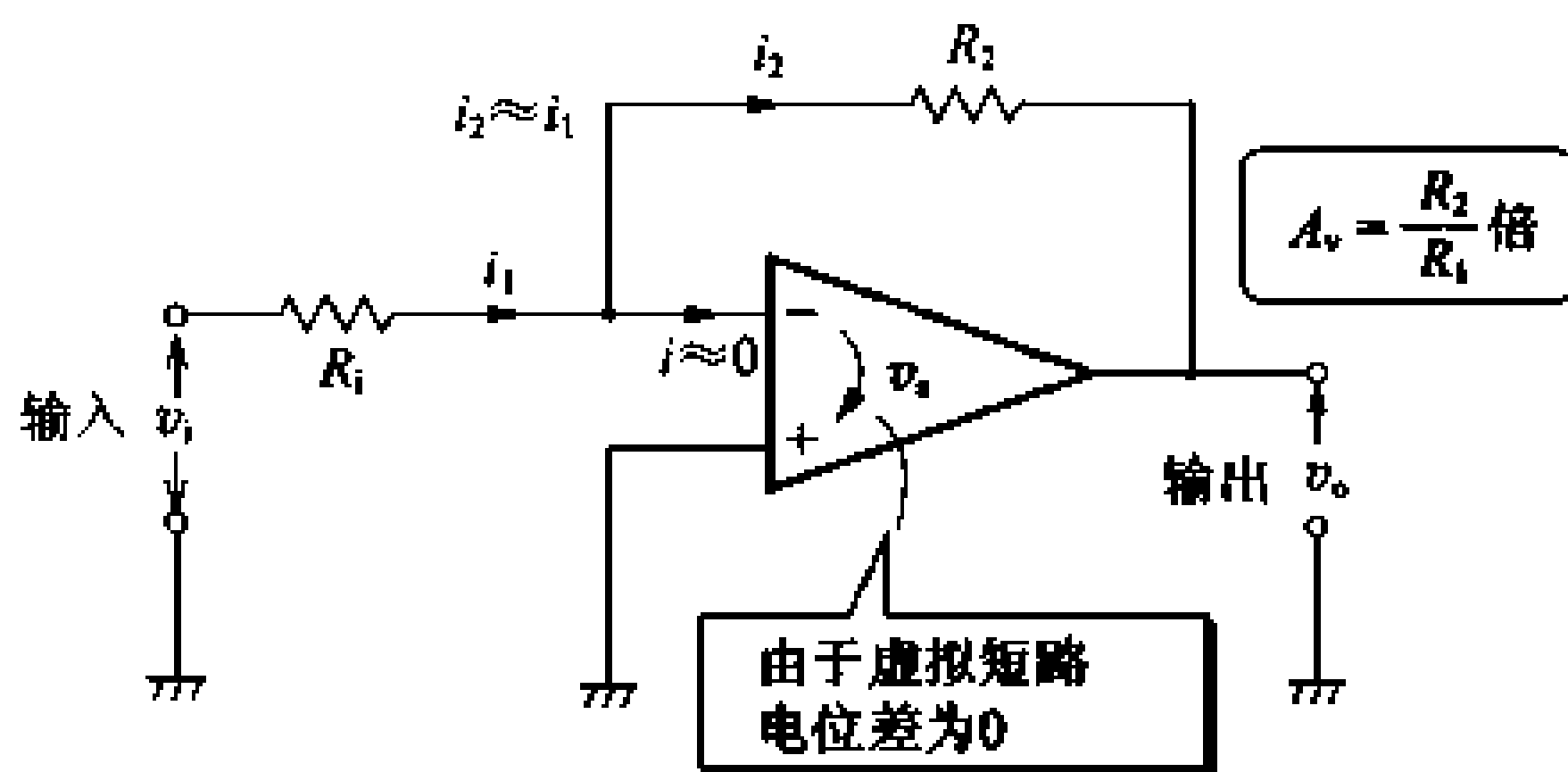


图 3.39 反相放大器



## 负反馈

另外,式(3.41)中的负号表示输出极性与输入极性相反,即相位相差  $180^\circ$ 。这种电路将输出的一部分返回到反相输入端。故称它为负反馈。

## ● 同相放大器

图 3.40 给出同相放大器。如果运算放大器的增益为  $A_o$ ,那么,就得到

$$v_o = A_o \cdot v_i \quad \text{即} \quad v_i = v_o / A_o$$

如果认为  $A_o$  为无限大,于是  $v_i \approx 0$ ,也就是说,输出是有限时,输入电压  $v_i$  几乎为 0。称这种状态为虚拟短路。从这种虚拟短路可知,由于输入端之间的电位差为 0,所以,输入电压  $v_i$  和  $R_1$  两端的电压相等。另外,因为输入阻抗极其大,所以,得到  $i_2 \approx i_1$ 。可是输入电压  $v_i$ ,因为输出电压  $v_o$  和在  $R_1$  和  $R_2$  上的分压部分相等,所以,  $v_i$  应为

$$v_i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o \quad (3.42)$$

所以

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.43)$$

从上式可以看出;同相放大器也是由外加电阻来决定放大倍数。从上式可知  $A_v$  最小也比 1 大。

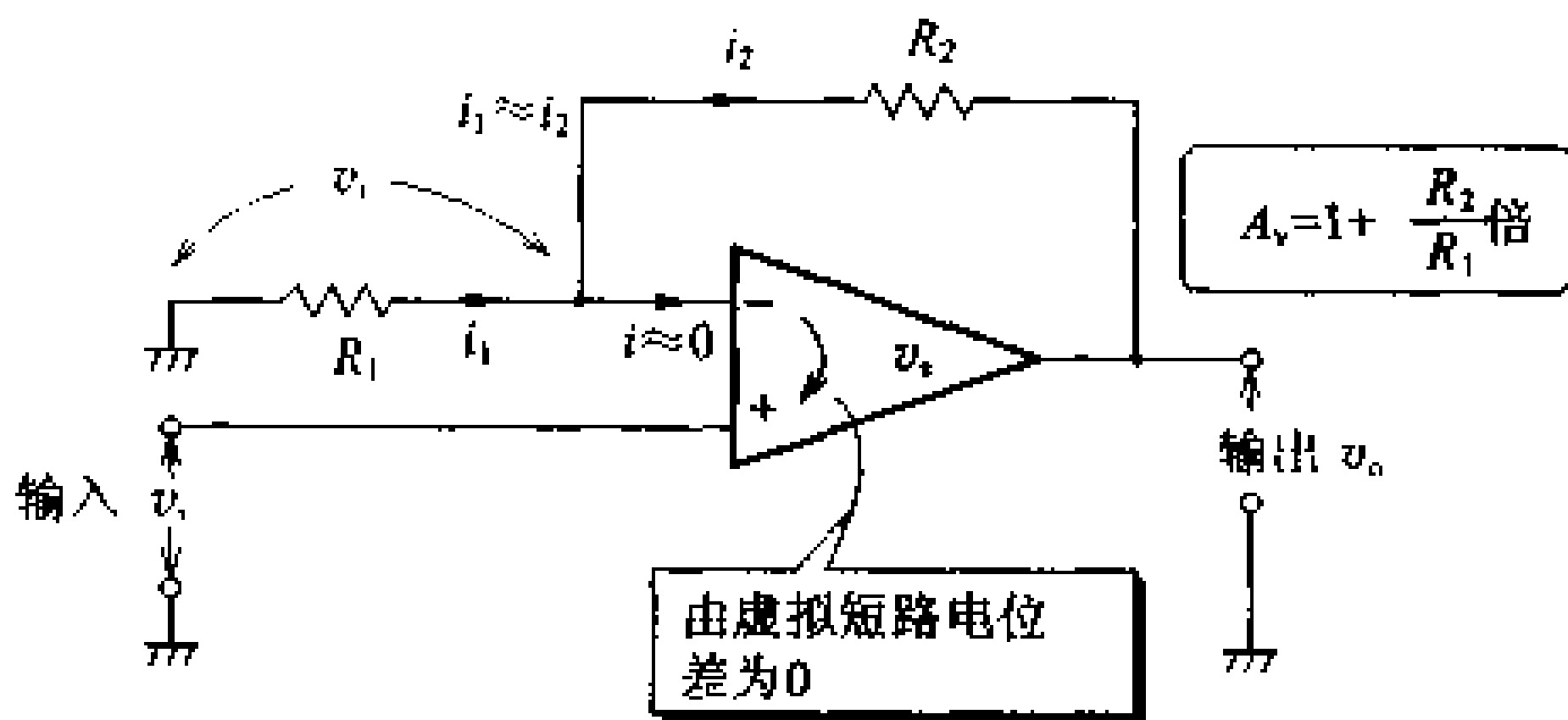


图 3.40 同相放大器

## 13 IC化的放大器(Ⅱ)

### □ 要点

作为音频放大器用的 IC, LM368 是一种只需外加少量元件就可得到最大 1W 输出的器件。

VCO (Voltage controlled oscillator) 是用外部的直流电压来控制振荡频率的振荡电路。

PLL 是一种能把输入信号和振荡器输出信号的相位差保持在定值下的反馈控制电路。它由相位比较器(PC)、低通滤波器(LPF)和电压控制振荡器(VCO)构成。它是频率合成器、FM 解调器、FM 多路解调器、电视同步信号发生电路以及 VTR 的电动机控制等用途很广的 IC。

IC 定时电路是由线形比较器和数字触发器构成。它被使用在定时器、多谐振荡器、单稳态多谐振荡器、脉宽调制器和锯齿波发生器等。把放大二个输入电压之差的电路称作差动放大电路。

### □ 解释 ● 音频放大器

图 3.41 给出了 LM386 的引脚配置图和内部电路。使用电源电压 6~9V, 电压增益为 20 倍, 在引脚 1 和 8 之间接入电容器, 可得 200 倍的输出。图 3.42 给出了输出 0.3W 的功率放大器实例。接在输出端的 C 和 R 是防止振荡用的。

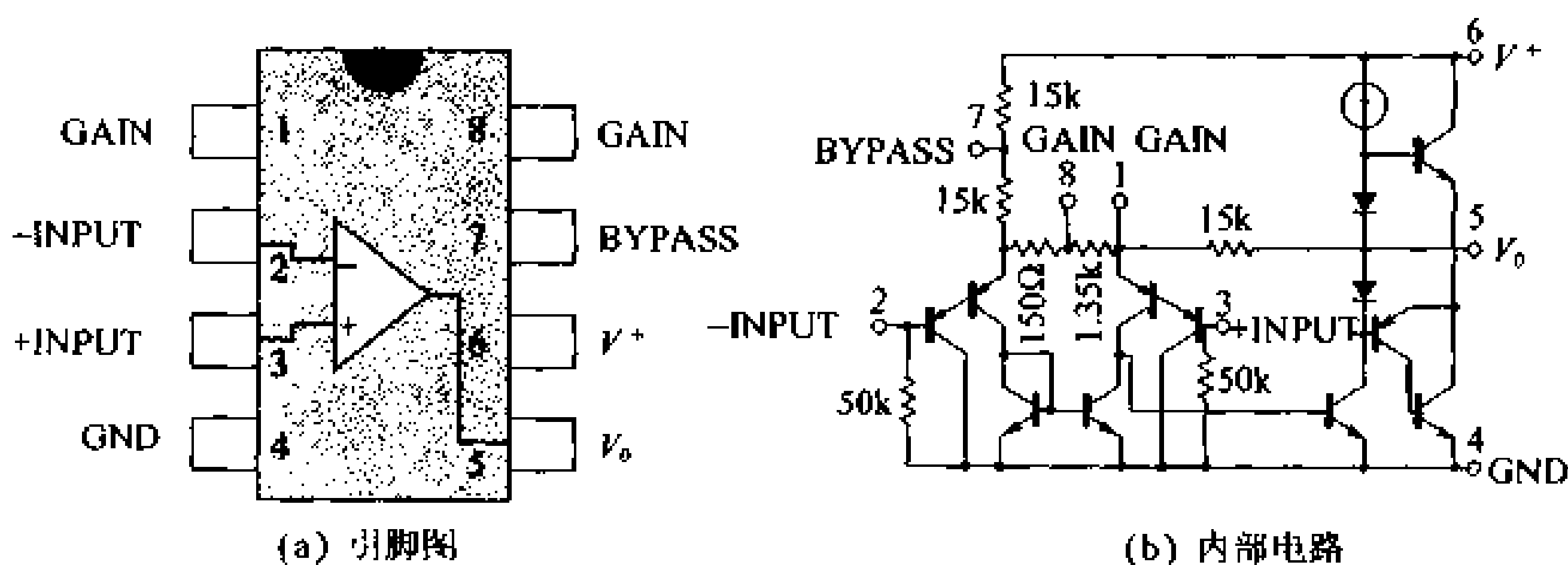


图 3.41 LM386 的引脚图和内部电路

### ● 压控振荡器(VCO)

作为 VCO 专用的 IC 有 566IC。用外部直流电压, 可改变矩形波和三角波的频率。图 3.43 给出了内部的方块图和连接图。

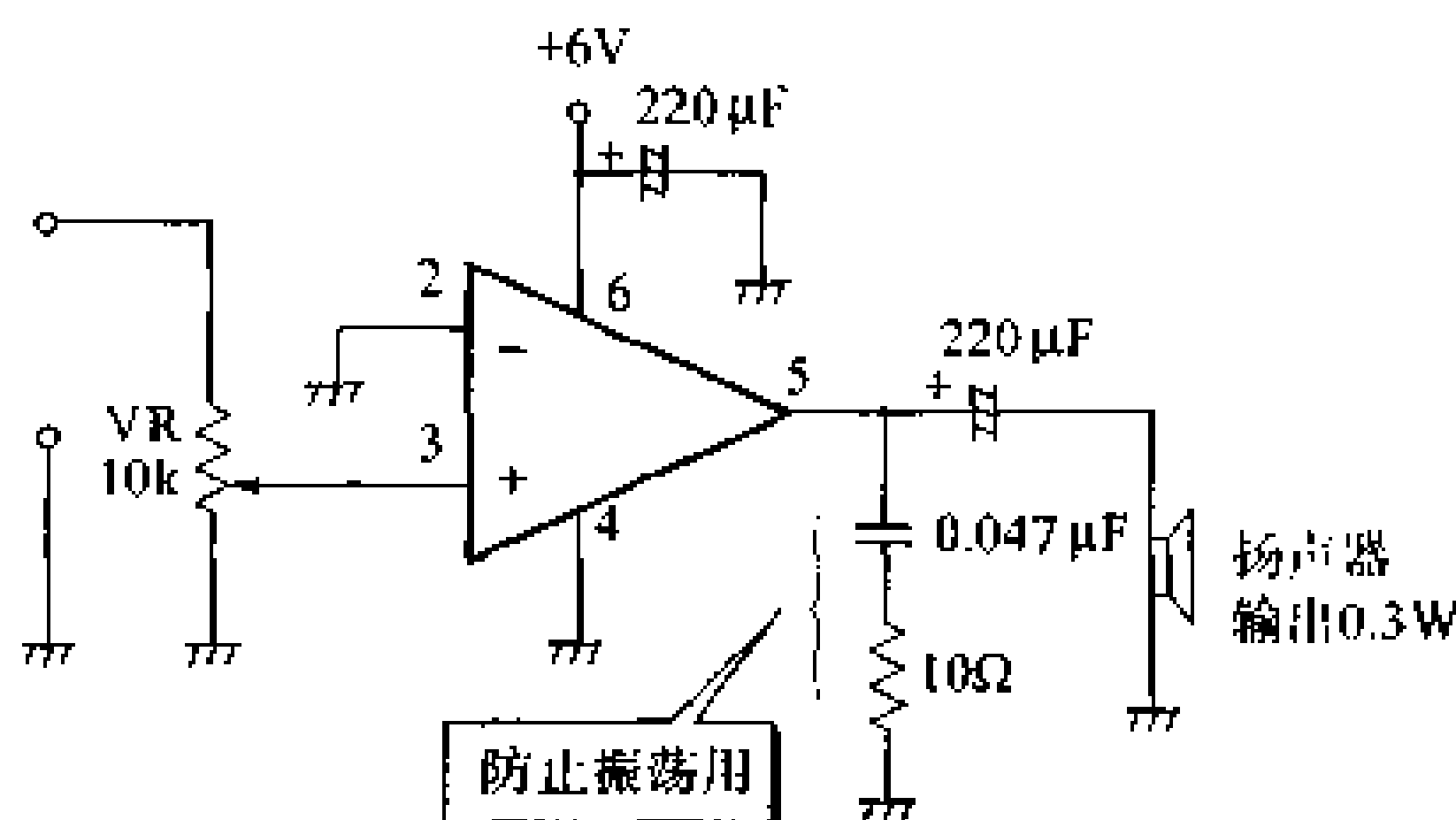


图 3.42 电路连接例

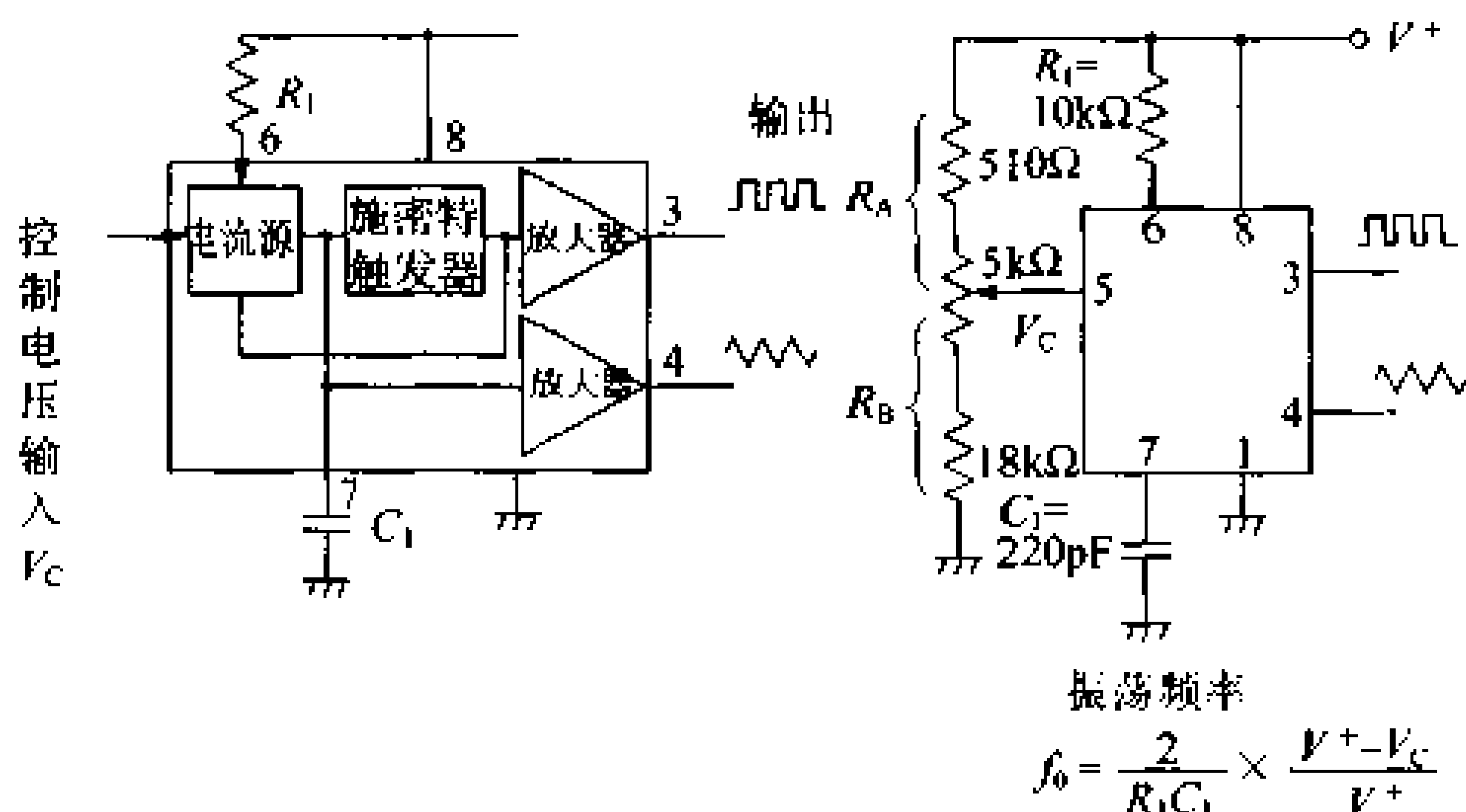


图 3.43 VCO 的方块图和连接图

振荡频率由外接电阻和电容以及加在电流源电路上的直流电压来决定。振荡频率可由下式给出：

$$f_0 = \frac{2}{R_1 C_1} \left( \frac{V^+ - V_c}{V^+} \right)$$

这种 IC 可在如下条件下使用：

①  $R_1$  :  $2\text{k}\Omega \leq R_1 \leq 20\text{k}\Omega$  ; ②  $V_c$  :  $3/4V^+ \leq V_c \leq V^+$  ; ③  $f_0$  在 1MHz 以下 ; ④  $V^+$  : 10~24V 以下。

### ● IC 锁相环(PLL)

图 3.44 给出了 PLL 的基本方块图。在没有输入信号状态下,PLL 不能取得同步,VCO 的振荡与输入信号毫无关系。称这个振荡频率为自由振荡频率。加入输入信号后,相位比较器就产生一个与输入信号和 VCO 信号之间相位差相对应的电压。该电压经低通滤波器平滑,并且成为 VCO 的控制电压。受该电压的控制,输入信号和 VCO 的频率之差将达到最小。其结果是 VCO 的振

自由振荡频率

荡频率变成和输入信号频率基本相同,使相位差保持在某个固定值上。

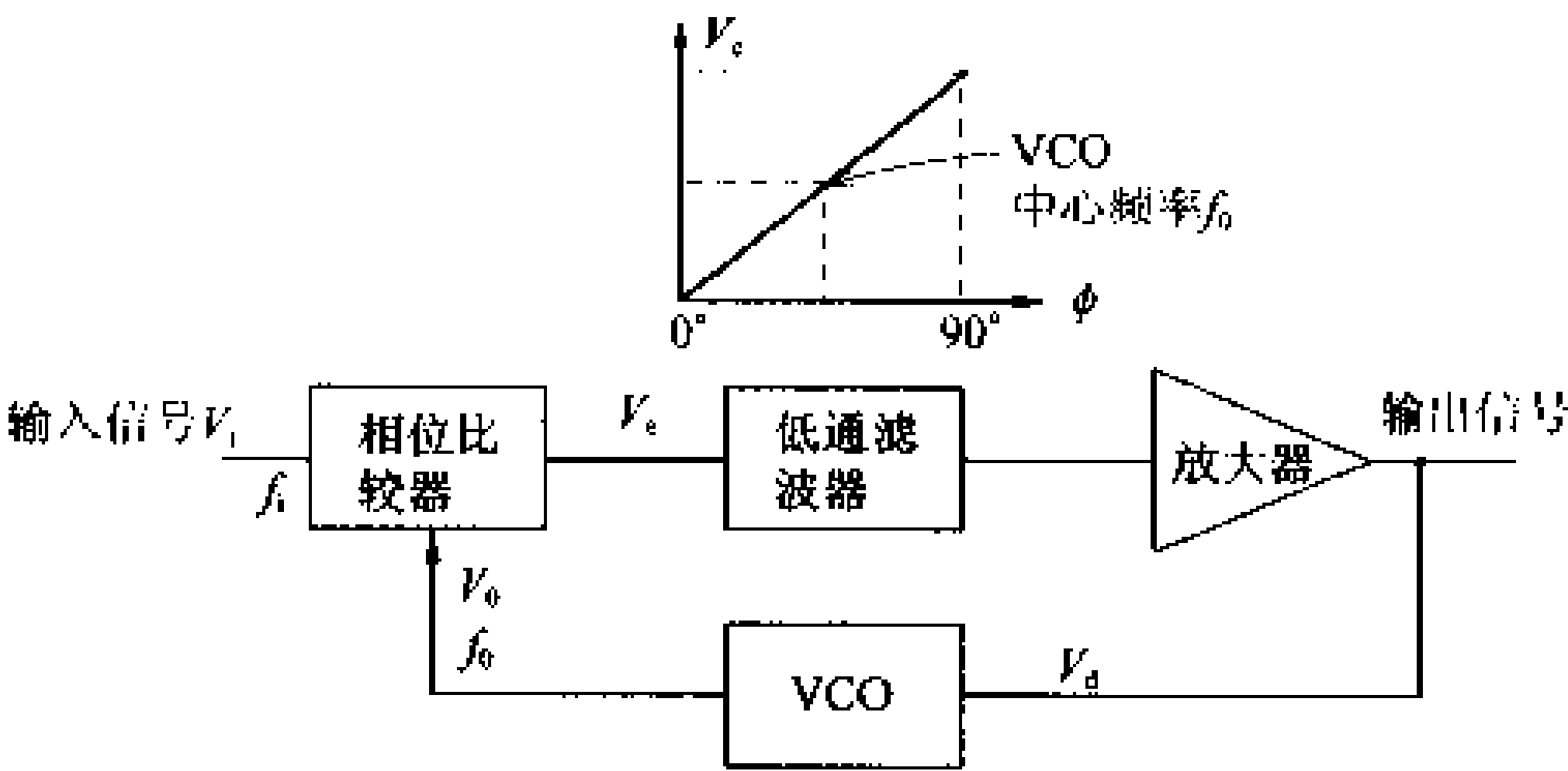


图 3.44 基本 PLL 的方块图

● FM 解调器

图 3.45 给出了采用 PLL 来进行频率解调的例子。IC565 是 PLLIC,其内部有相位比较器、放大器和 VCO。外部连接的  $R_1$  和  $C_1$  决定着 VCO 的自由振荡频率,其频率调到可变范围的中心频率处。PLL 的中心频率调到 FM 载波的频率上。如果将受到频率调制的已调波加给输入端,就会有输出与频率变化相对应的电压。也就是说,进行了 FM 解调。

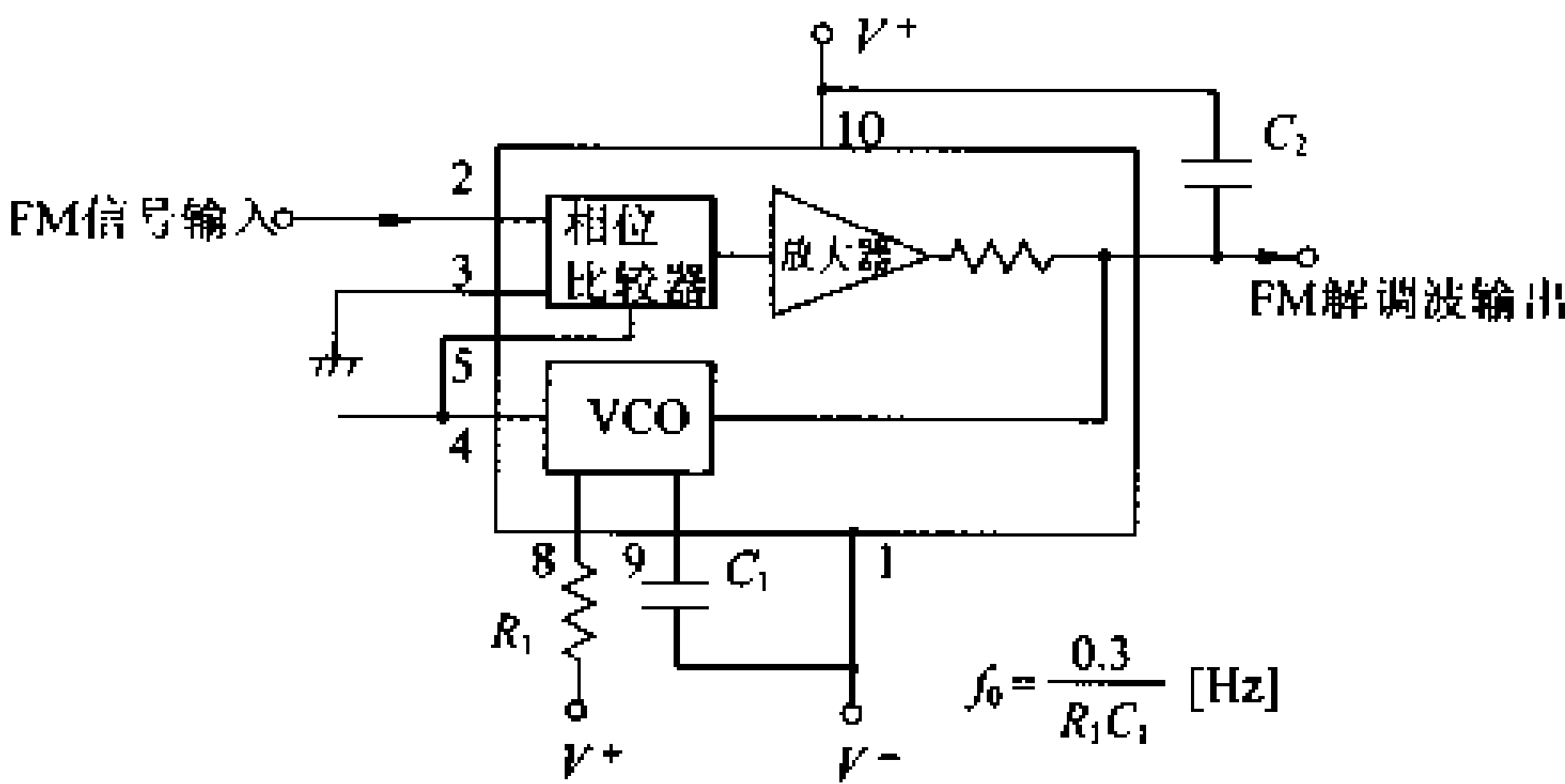


图 3.45 采用 PLLIC 的 FM 解调器

● 频率合成器

频率合成器如图 3.46(a)所示那样,是在基本 PLL 的电路里加进分频器的器件。是一种用适当的频率步长来改变输出频率,从而

获得稳定频率信号的器件。其频率稳定性和标准信号相同,所以在标准信号里使用了频率稳定的晶体振荡器。

现在将 VCO 的输出频率用分频器进行  $1/N$  分频,分频后的信号作为  $f_0$  加到相位比较器上。反馈控制起着使相位差达到保持在某个稳定值的作用,VCO 的输出就等于  $Nf_0$ 。也就是说,通过改变分频器的分频数  $N$ ,来得到频率为输入信号  $N$  倍的稳定输出。可以输出的周频范围取决于 VCO 的频率特性。图 3.46(b)是用 565 作为 PLLIC,用 7490 作为分频器的例子。

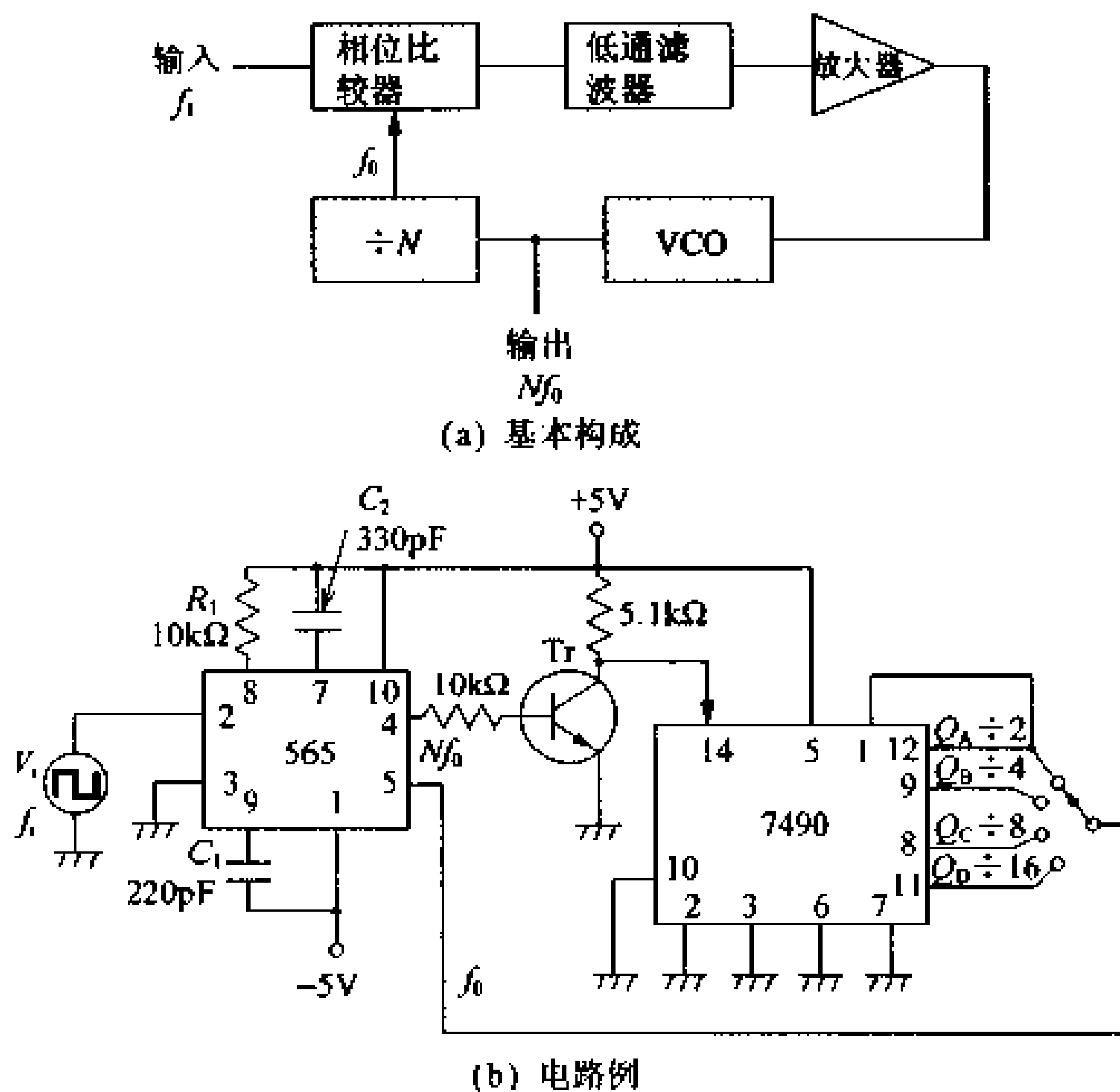


图 3.46 分频器的基本构成及其电路例

### ● IC 化定时电路

图 3.47 给出 IC 化定时电路和引脚图。其内部是由二个比较电路和 RS 双稳态电路(RS-FF)以及放电用的晶体管 Tr 组成。将串联连接的三个电阻  $R$  与比较电路连接。在比较电路上加  $2/3V^+$  和  $1/3V^+$  的电压。比较电路 1 的门限输入电压一达到  $2/3V^+$  以上,比较电路 2 就反转并复位 FF,Tr 饱和,将输出置成 0。另外,比较电路 2 的触发输入电压一达到  $1/3V^+$  以上,FF 就复

位, Tr 截止, 输出变为 1。图 3.48 给出了多谐振荡器的实用例子和输出。

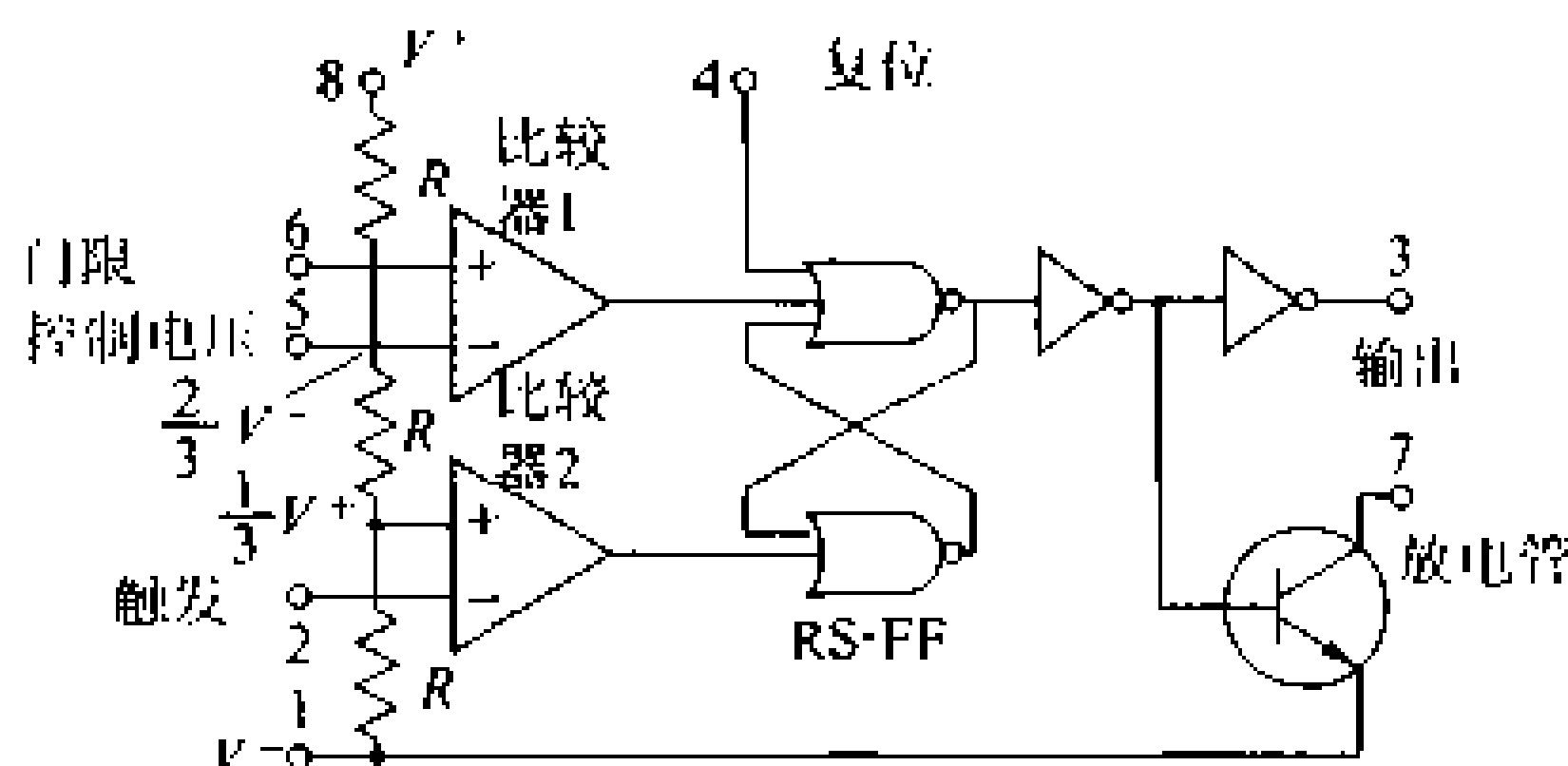


图 3.47 IC 化定时的方块电路图

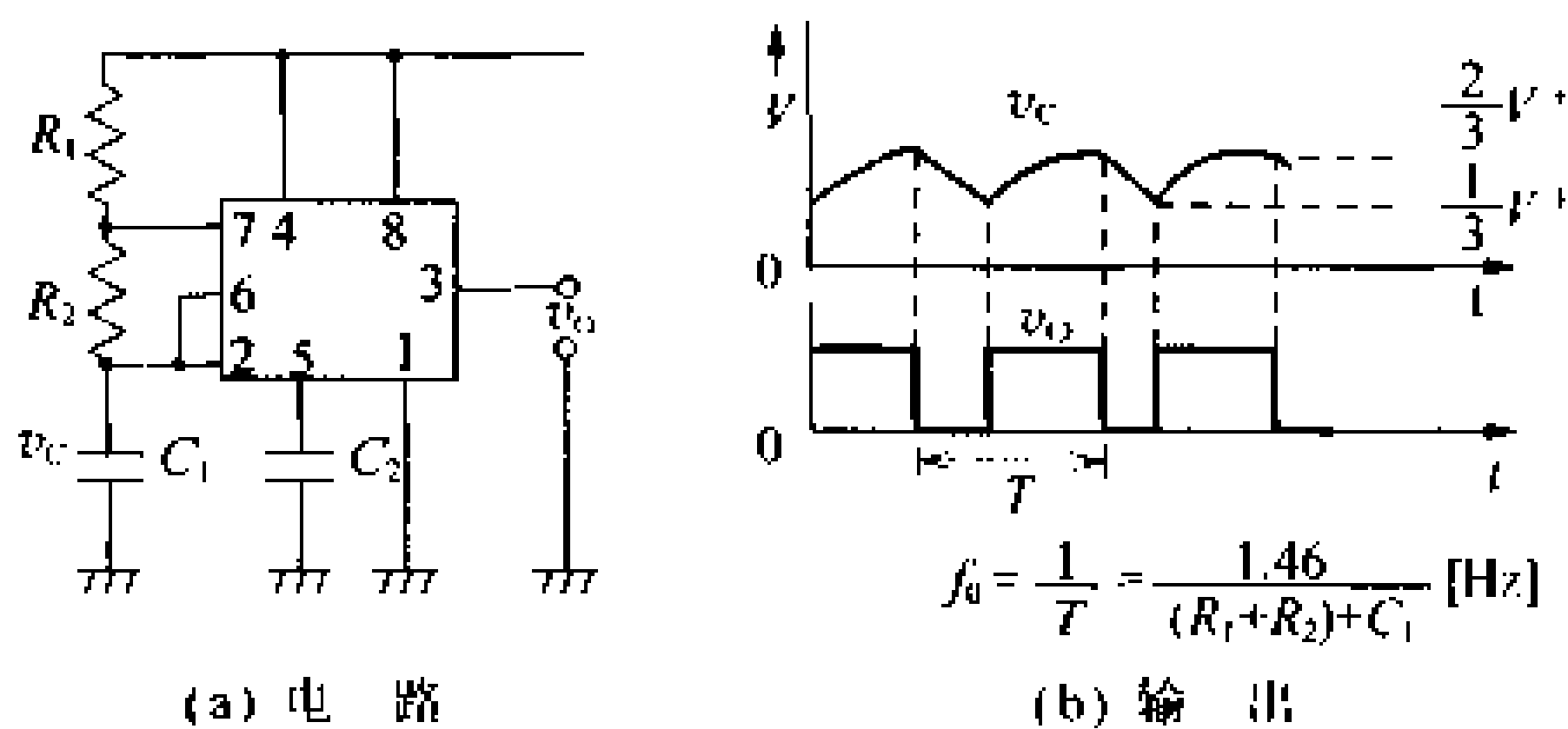


图 3.48 不稳定多谐振荡器

### ● 差动放大电路

图 3.49 给出采用运算放大器的差动放大电路。我们来求图 3.49 的输出电压。因为运算放大器的输入阻抗极大, 所以, 运算放大器没有输入电流。另外, 由于流过  $R_1$  和  $R_1$  的电流相等, 则有

$$i_1 = \frac{v_1 - v_n}{R_1} = \frac{v_p - v_n}{R_1}$$

$$v_n = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)v_n - \frac{R_f}{R_1}v_1$$

根据虚拟短路,  $v_n = v_p$ , 所以上式变为

$$v_n = v_p = \frac{R_f}{R_2 + R_3}v_2$$

把  $v_n$  代入上式, 则得

$$v_n = \frac{R_1 + R_1}{R_1} \cdot \frac{R_f}{R_2 + R_3}v_2 - \frac{R_f}{R_1}v_1$$

假如  $R_1 = R_2$ ,  $R_f = R_3$ , 就得

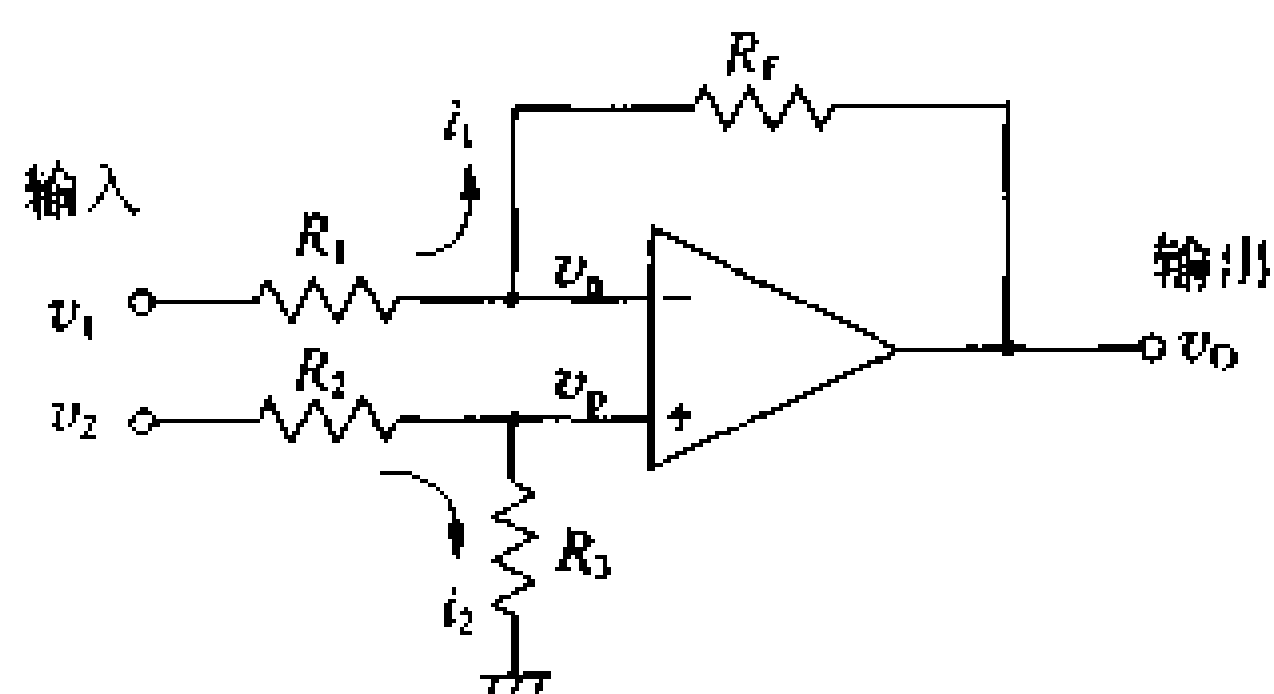


图 3 49 差动放大电路

$$v_o = \frac{R_f}{R_1} (v_2 - v_1)$$

输入电压之差是以  $R_f/R_1$  倍进行放大。由于信号的成分相抵消，所以，它可作为消除二个信号里的共同噪声的电路来使用。

### 例 题

试求图 3.43 接线图中,  $R_A = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_B = 15\text{k}\Omega$ ,  $V^+ = 12\text{V}$  时的  $f_o$ 。

答  $V_C = \frac{R_B}{R_A + R_B} \cdot V^+ = \frac{15}{1 + 15} \cdot 12 = 11.25 \text{ V}$

$$f_o = \frac{2}{(10 \times 10^3)(220 \times 10^{-12})} \cdot \frac{12 - 11.25}{12} \approx 56.8 \text{ kHz}$$

# 14 振荡的原理

## □ 要点

把即使不从外部加信号,信号也连续发生的现象称为振荡。振荡有反馈式和负阻式两种,反馈式较常用。要用反馈式电路产生振荡,还需要有放大信号的电路,把信号返回到输入端的正反馈电路,以及决定信号频率的选频电路。

## □ 解释

### ● 振荡的基本条件

身边经常出现振荡现象,如为了提高微音量而从扬声器发出的“嗡嗡”声。在构成振荡电路的放大电路里,可使用着晶体管,场效应晶体管以及运算放大器等。反馈电路是以频率选择电路进行工作。

振荡的基本条件如下:

- ① 环路增益在 1 以上;
- ② 振荡频率是由反馈电路的虚数部为 0 的条件来决定。

### 正反馈

振荡原理如图 3.50 所示。如果把已放大的信号按照与输入同相那样送到输入端(称为正反馈),那么输入信号就比以前有所增大。增大了的信号再放大,而后再由反馈电路送回。这样一来,返回输入端的信号将逐渐增大,不过,不可能无限地增大,达到某个定值时就不再增大了。称这种现象为振荡。这时,如果设放大器的放大倍数  $v_o/v_i$  为  $A$ ,反馈电路的反馈系数  $v_f/v_o$  为  $\beta$ ,那么,在振荡持续且输出恒定时, $v_i=v_f$ ,于是就有  $A\beta=1$  的关系。把这个关系叫作环路增益等于 1。它是振荡所需满足的基本条件之一。

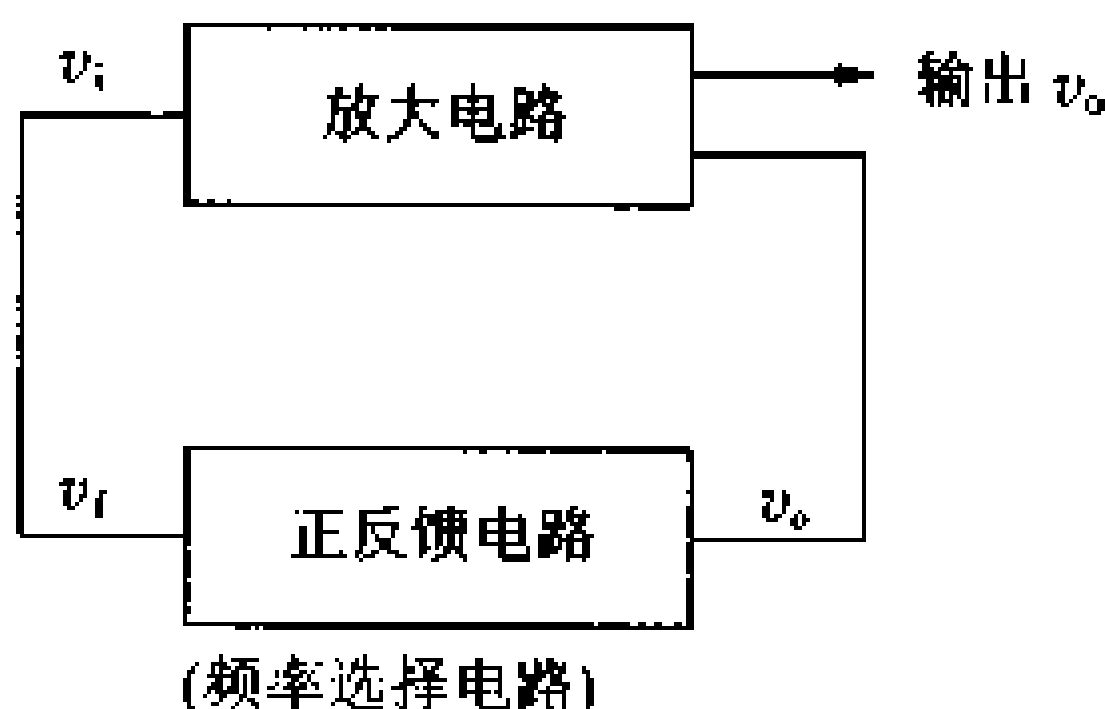


图 3.50 振荡的原理

把在反馈电路里使用  $C$  和  $R$  的电路称作  $RC$  振荡电路,而将使用  $L$  和  $C$  的电路称作  $LC$  振荡电路。反馈系数  $\beta$  可用复数公式表示。从这个公式的虚部等于 0 的条件可求出振荡频率。当频率



为这个振荡频率时,输入端就有正反馈。这是产生振荡的另一个基本条件。

既然没有从外部加信号,为何还有信号输出呢?其实并不是一下子就进入振荡状态的。一般情况下,电路里总有噪声(例如晶体管 and 电阻内的热噪声),这种噪声就好像是振荡的“种子”。最初的噪声“种子”被振荡器电路中的放大器所放大,被放大的“种子”噪声又通过反馈电路返回到输入端。返回的噪声比最初的增大了 $A$ 倍。这时,如果反馈电路具有频率选择性,那么,特定频率的衰减就减小。这样就会引起振荡。表 3.1 给出了各种正弦波振荡电路的分类。

表 3.1 正弦波振荡电路的分类

反馈式振荡器	RC 振荡电路	相位式 维恩电桥式
	LC 振荡电路	调谐式;集电极调谐式,基极调谐式,发射极调谐式 科耳皮兹式 哈脱莱式
	晶体振荡电路	皮尔斯 C-B 式 皮尔斯 B-E 式

RC 振荡电路用于低频振荡器,LC 振荡电路和晶体振荡电路用于高频振荡器。

### ■ 例 题

RC 振荡器的频率精度约为  $5 \times 10^{-3}$ ,晶体稳频振荡器的精度约为  $5 \times 10^{-6}$ 。试求标称频率是 1MHz 的各种振荡器的频率偏差。

**答** 假定振荡频率为  $f_0$ ,精度为  $\delta$ ,那么频率偏差  $\Delta f$  从  $\Delta f = \delta f_0$  可得:

$$\Delta f_1 = \delta f_0 = 5 \times 10^{-3} \times 10^6 = 5 \times 10^3 = 50\text{kHz}$$

$$\Delta f_2 = \delta f_0 = 5 \times 10^{-6} \times 10^6 = 5\text{Hz}$$

从结果可以看出:RC 振荡器的频率偏差是 50kHz,即在  $1\text{MHz} \pm 50\text{kHz}$  范围内振荡。而晶体振荡器的频率偏差是 5Hz,即在  $1\text{MHz} \pm 5\text{Hz}$  范围内振荡。

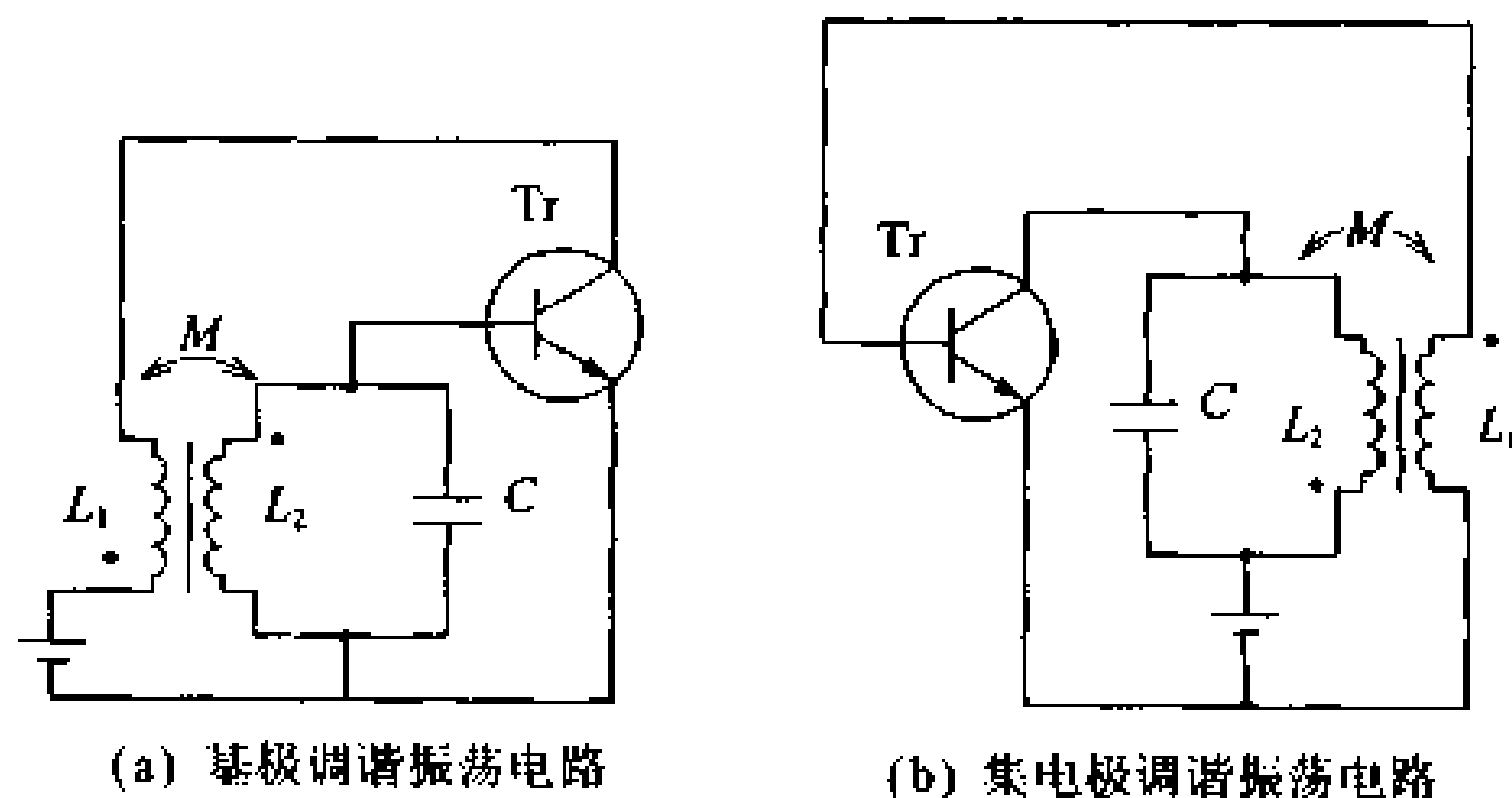
# 15 LC 振荡电路

**要 点** 把在反馈电路里采用线圈  $L$  和电容器  $C$  进行频率选择的电路称为 LC 振荡电路。LC 振荡电路中有调谐式, 哈脱莱式以及科耳皮兹式

**解 释** ● 调谐式振荡电路(反向耦合振荡电路)

图 3.51 给出了调谐式振荡电路。二组线圈是以互感  $M$  进行耦合。这是为了将输出的一部分返回到输入。 $L_1$  和  $L_2$  的耦合方向应符合返回信号和输入信号相加的关系。图中的圆点符号是表示相位方向相同。振荡频率可用下式给出:

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C}} [\text{Hz}]$$



(a) 基极调谐振荡电路

(b) 集电极调谐振荡电路

图 3.51 调谐式振荡电路

## ● 哈脱莱振荡电路

哈脱莱振荡电路是从一个线圈取出一个抽头, 从抽头去看, 上、下线圈两端的电压具有  $180^\circ$  相位差。图 3.52(a) 给出了它的原理图。同图(b)给出了实用电路。其振荡频率可用下式给出:

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}} [\text{Hz}]$$

## ● 科耳皮兹振荡电路

将哈脱莱电路中的线圈和电容器交换位置, 所得到的电路称

为科耳皮兹振荡电路。图 3.53(a)给出了原理图,而图 3.53(b)给出了实用电路。振荡频率可用下式给出:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_0}} \text{ [Hz]}$$

式中,  $C_0 = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$

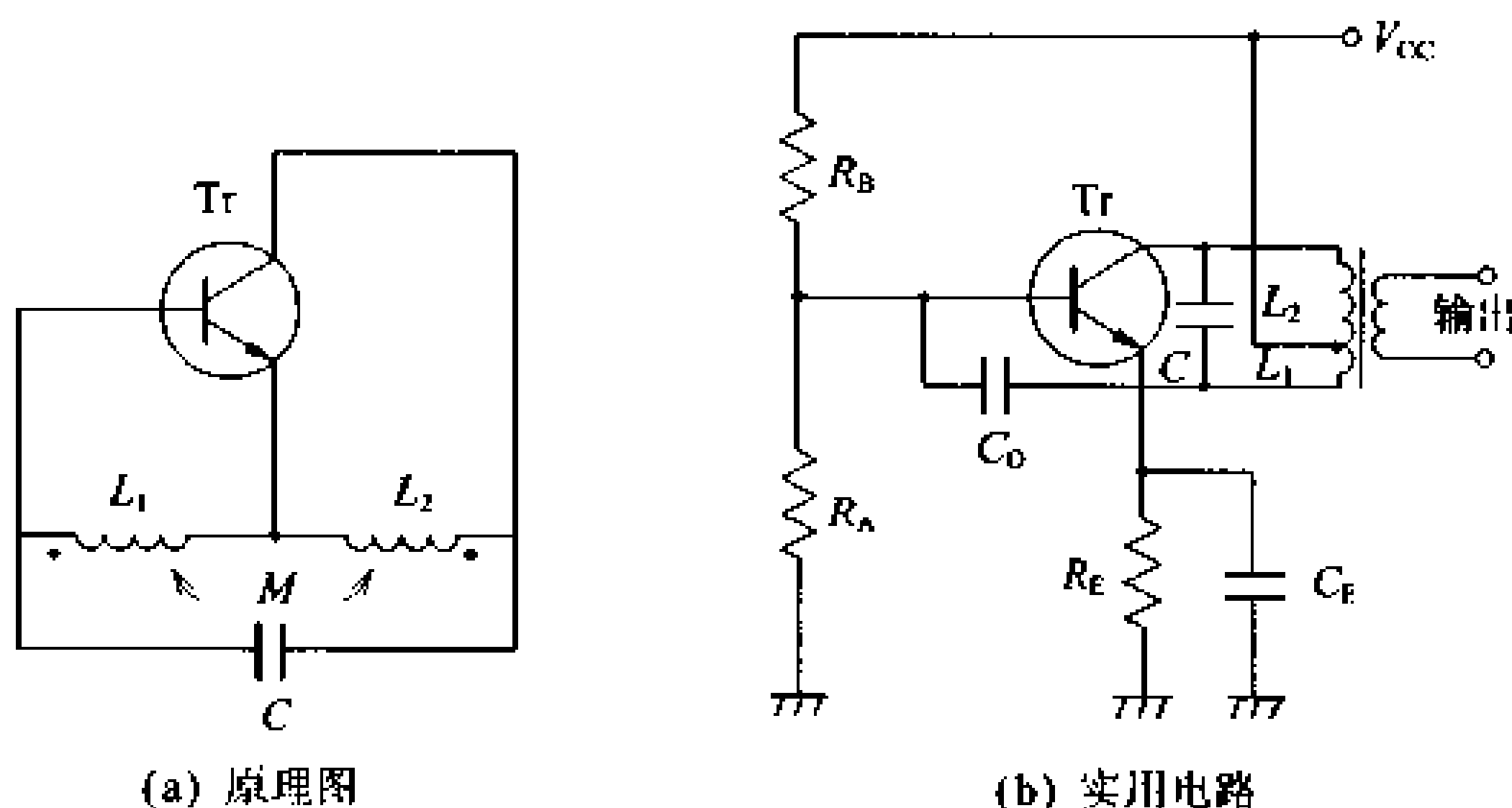


图 3.52 哈脱莱振荡电路

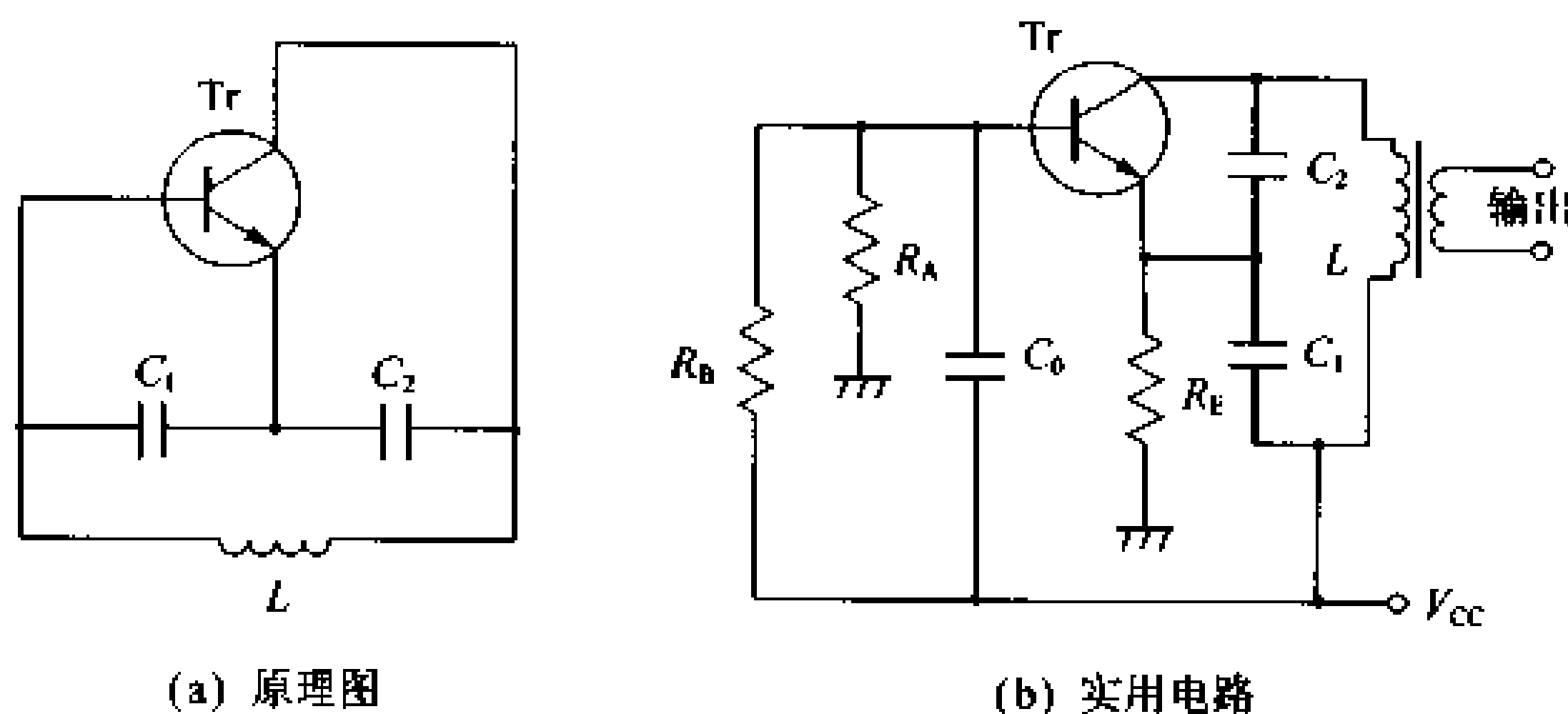


图 3.53 科耳皮兹振荡电路

### 例 题

图 3.51 所示,集电极调谐式振荡电路中  $L_2 = 10\mu\text{H}$ 、 $C = 250\text{pF}$  时,试求振荡频率。

**答** 
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C}}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{10 \times 10^{-6} \times 250 \times 10^{-12}}} = 3.18 \text{ MHz}$$

# 16 RC 振荡电路

**要 点** 将反馈电路里采用电容器  $C$  和电阻  $R$  进行频率选择的振荡电路称为  $RC$  振荡电路。它有移相式和维恩电桥式两种。

**解 释** ● 移相式振荡电路

移相式振荡电路如图 3.54 所示,它是经三组  $RC$  反馈到输入端的电路。因为运算放大器的反向输入端和输出端之间有  $180^\circ$  的相位差,所以,如果用三组  $RC$  将相位后移  $180^\circ$ ,那么,反馈信号将成为和输入同相位,于是成为正反馈进行振荡。

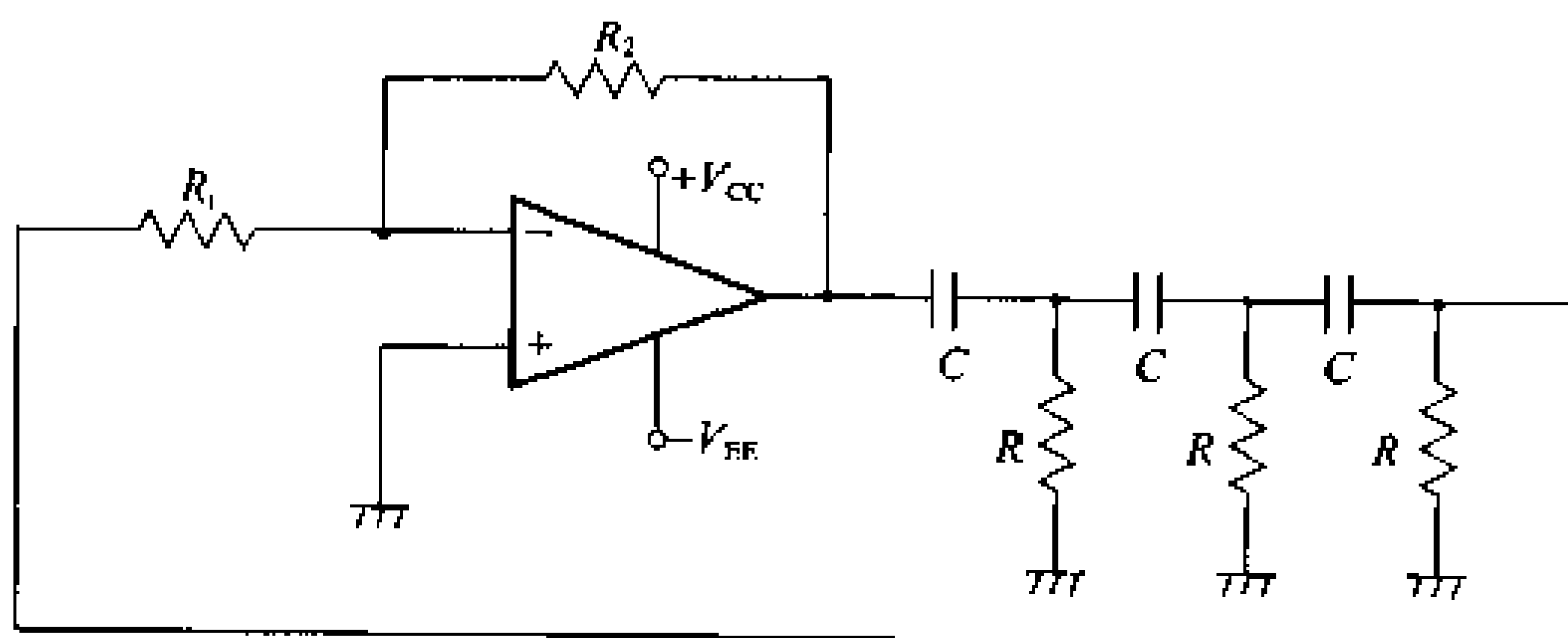


图 3.54 移相式振荡电路

这个电路的振荡频率  $f_o$  以及反馈系数  $\beta$  可用下式给出:

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC \sqrt{6}} [\text{Hz}], \quad \beta = \frac{1}{29}$$

由上式可得运算放大器的增益  $A(R_1/R_1) \geq 29$ 。

图 3.55(a)给出了文氏电桥式振荡电路。而图 3.55(b)是画成另一种形式的文氏电桥的电路图。从虚拟短路条件知,运算放大器的二个输入端间的电压(b~c 间电压)是 0,所以,从电桥平衡条件可得:

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right)R_4 = \left[\frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}\right]R_3$$

展开上式,从实部的表达式可求得:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}$$

另外,振荡频率  $f_o$ ,从虚部的表达式可求得:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

假如  $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$ , 则得:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\frac{R_3}{R_4} = 1 + 1 = 2, \text{ 所以, } A = 1 + \frac{R_3}{R_4} = 3$$

也就是说, 如果由运算放大器制成的同相放大器的增益在 3 以上, 那么, 就满足了振荡的条件。

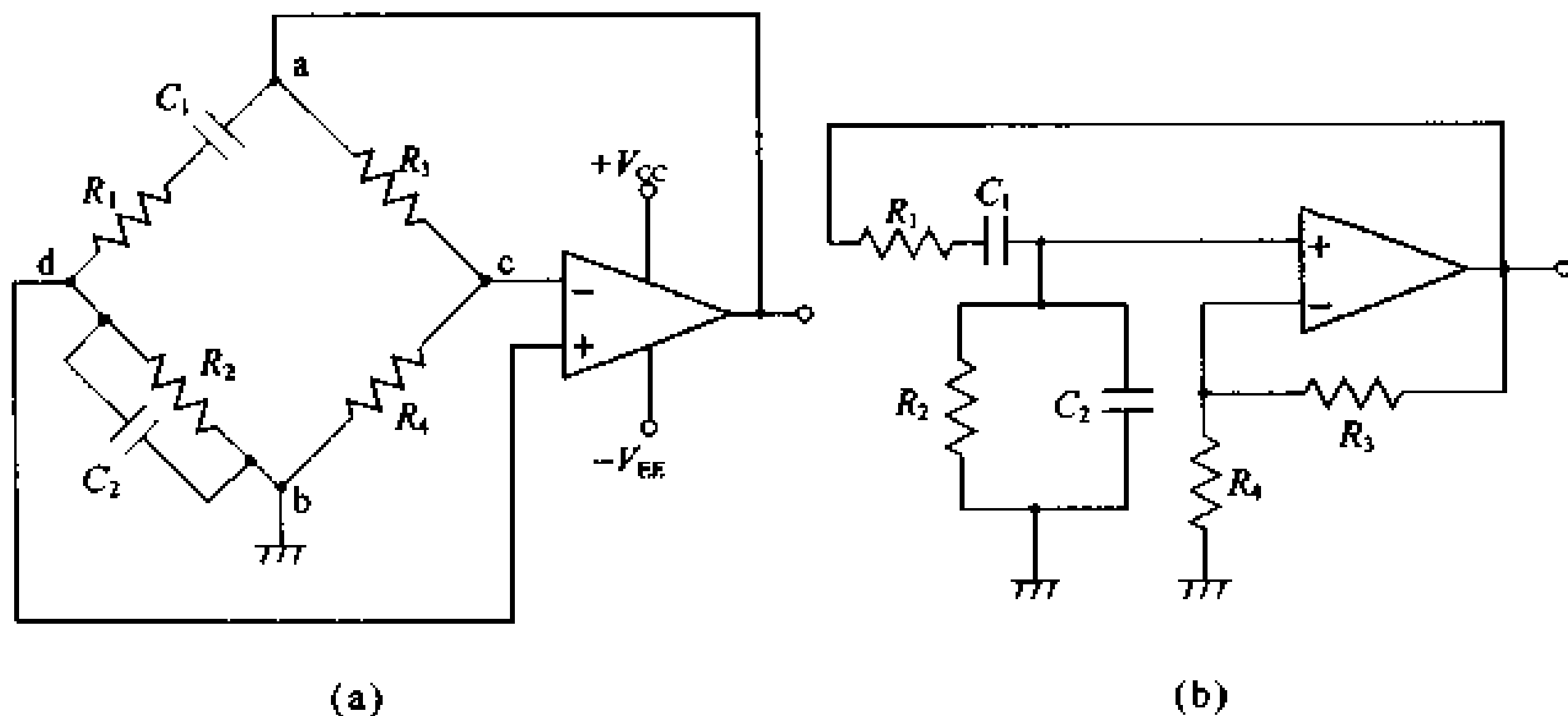


图 3.55 采用运算放大器的文氏电桥振荡电路

### 例 题

在图 3.55 里,  $R_1 = R_2 = 20\text{k}\Omega, C_1 = C_2 = 0.001\mu\text{F}$  时, 试求振荡频率。

答  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

$$= \frac{1}{2\pi(20 \times 10^3)(0.001 \times 10^{-6})} \approx 7960 \text{ Hz}$$

# 17 晶体振荡电路

## □ 要 点

石英晶体具有不随温度等变化而变化的、稳定的固有振荡频率。因此,采用石英晶体的振荡器的振荡频率,即使周围的温度、湿度和电源电压变化也几乎不变化。将LC振荡电路的L部分换成石英晶体,即可得到科耳皮兹振荡电路和哈脱莱振荡电路。

## □ 解 释 ● 石英晶体振荡电路

对石英晶片施加压力就产生+、-电荷,反过来,对晶片施加电压就产生晶片的机械性形变。称这一现象为晶片的压电效应。加在晶体上的直流电压,加了又断,断了又加,由于相互影响,于是就形成了以固有的频率进行振动。这一振荡频率因为不受周围温度、湿度的影响,所以,常被用在振荡电路里。

图3.56(a)是石英晶体振子的等效电路。图3.56(b)是电抗随频率变化的曲线。

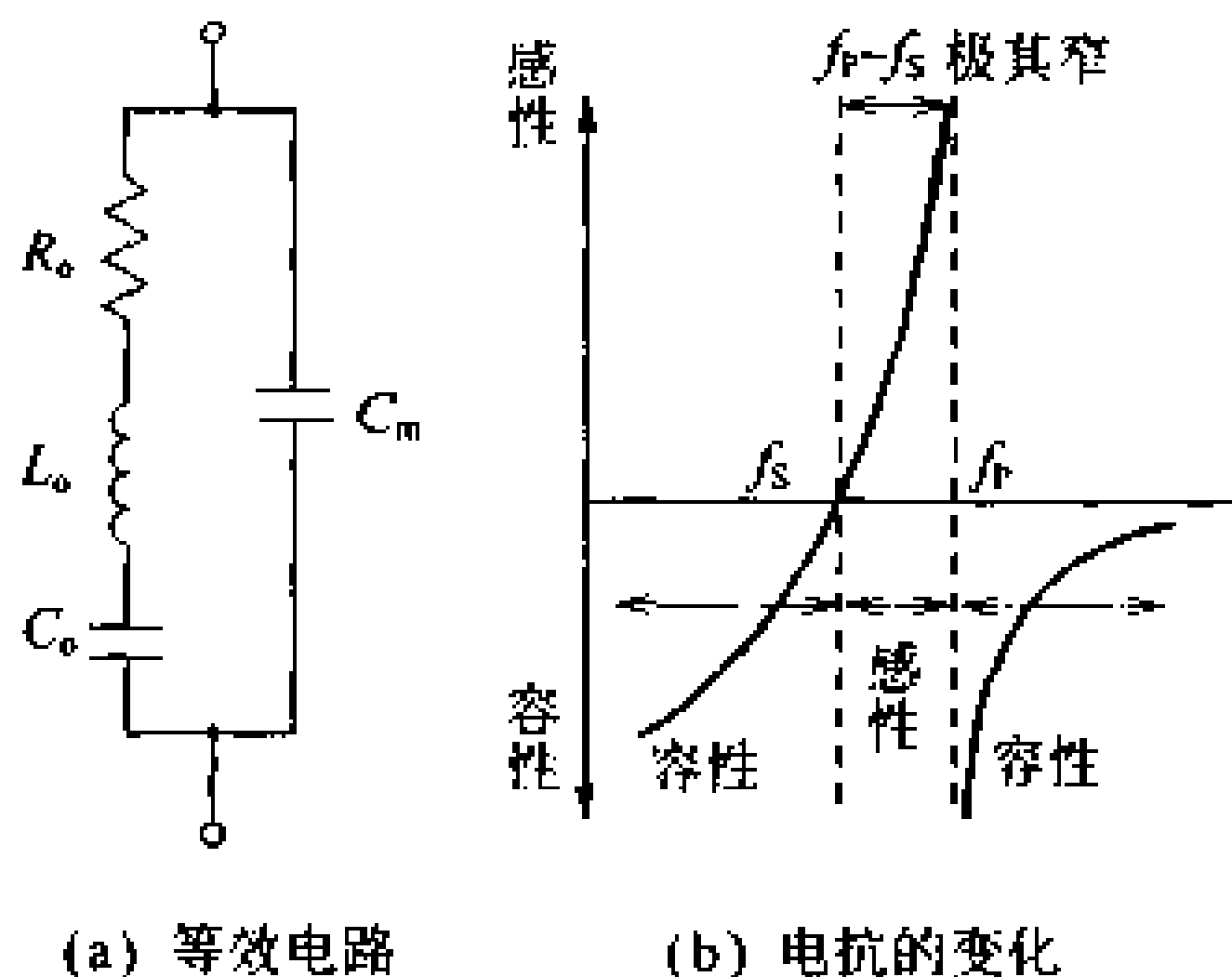


图 3.56 石英晶体振子的等效电路和电抗的变化

由等效电路可得串联谐振频率  $f_s$  为

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}}$$

又,并联谐振频率  $f_p$  为

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 \left( \frac{C_0 C_m}{C_0 + C_m} \right)}}$$

从图3.56(b)的电抗变化可知,串联谐振频率  $f_s$  到并联谐振频率

$f_p$  之间, 振子是以电感  $L$  进行工作的, 其频率区间为  $f_p \sim f_s$ 。但实际上, 因为  $C_0 \ll C_m$ , 所以,  $f_s \approx f_p$ 。

### ● 石英晶体振荡器的基本电路

LC 振荡电路的  $L$  部分可用晶体振子置换(如图 3.57)。

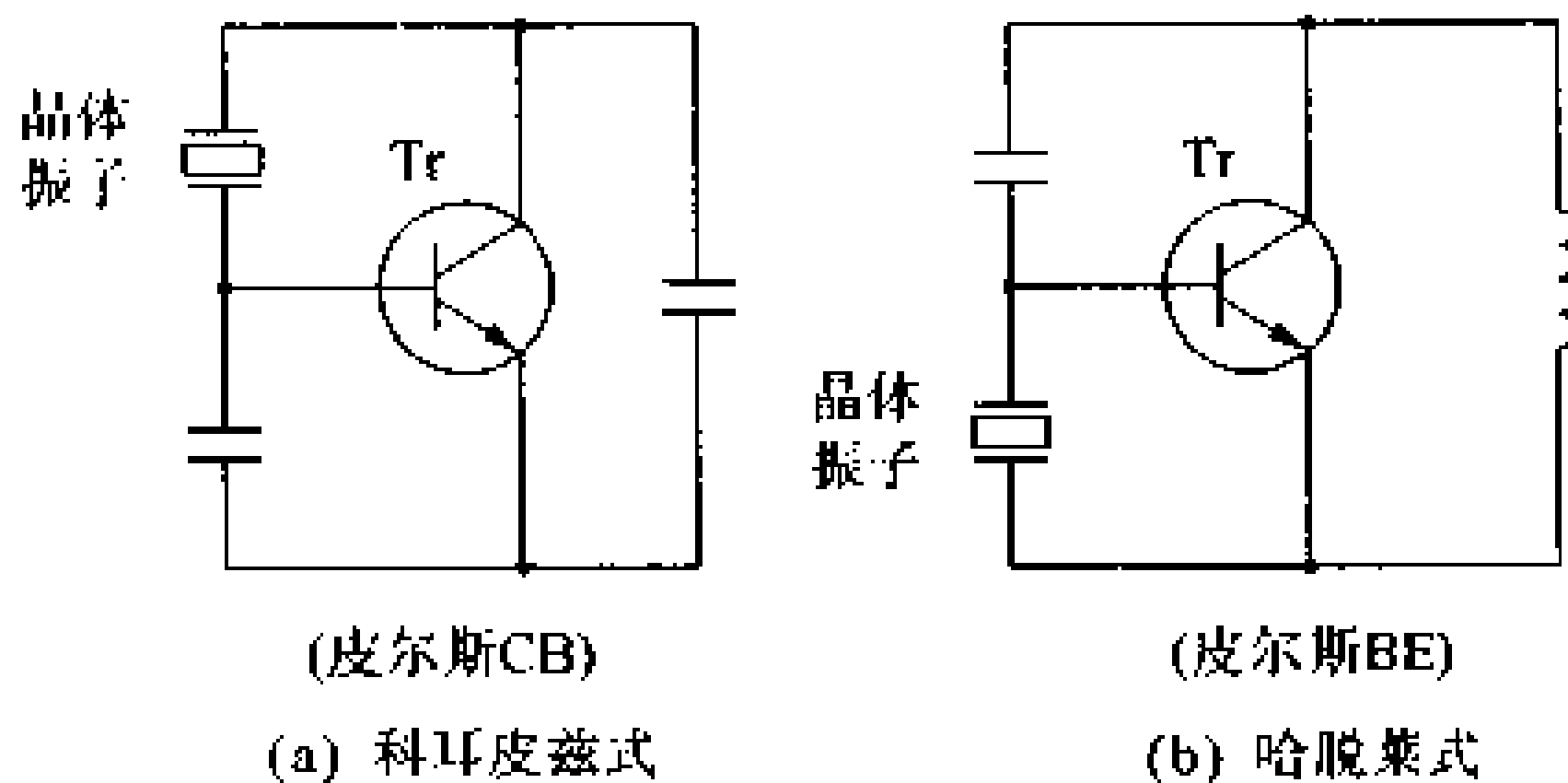


图 3.57 石英晶体振荡电路的基本原理

图 3.58 给出了科耳皮兹振荡电路的实际电路。

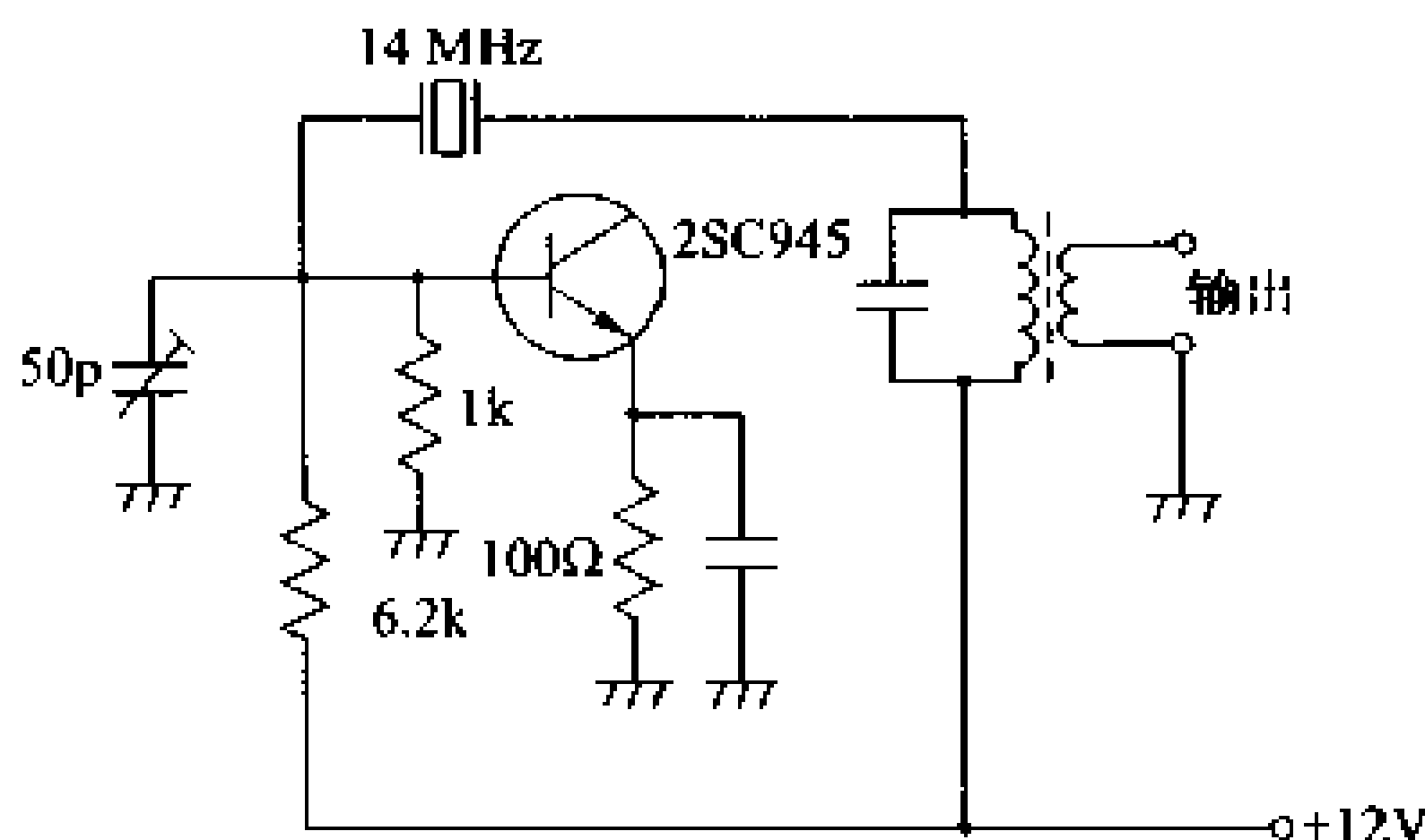


图 3.58 科耳皮兹振荡电路

### ■ 研究课题

为了晶体振荡器得到高的频率稳定度, 在从石英晶体上切下晶体振子时, 应选择振子温度系数小的切割方法; 另外, 还要将晶体振子放入恒温槽里, 使它周围的温度保持恒定。

# 18 频率变换电路

## □ 要点

把交流信号的某一频率变换成另一频率,叫作频率变换。收音机中就是把接收到的广播电台的频率变换成比其低的频率,经过放大后再恢复成声音。把二个交流信号加到有非线性元器件上就能够进行频率变换。

## □ 解释

### ● 频率变换的原理

如图 3.59 所示那样,如果将频率分别为  $f_1$ 、 $f_2$  的二个信号加到具有非线性输入输出的二极管、三极管或 FET 上,那么,在输出端就产生频率为  $f_1$  与  $f_2$  之和( $f_1 + f_2$ )和差( $f_2 - f_1$ )( $f_2 > f_1$ )的信号。称此现象为差频现象。

差频现象

和频信号和差频信号,可以用设在输出端的调谐(谐振)电路选出。

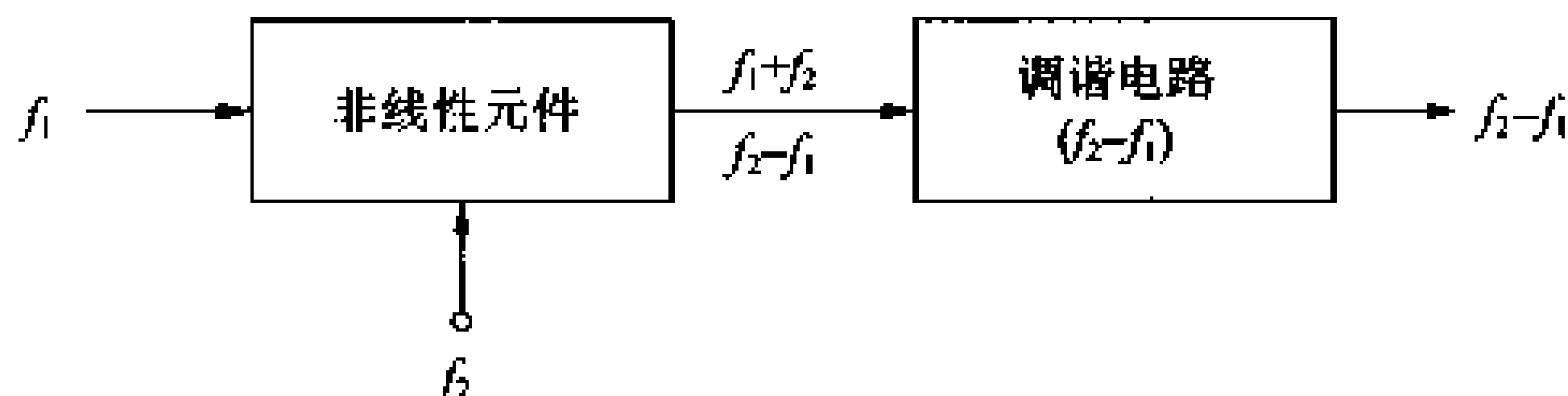


图 3.59 差频现象

频率变换的用途,可以举出如下实例:

① 用频率完全相同的放大器做成多级放大器时,容易产生后级反馈引发的振荡,这一问题可通过频率变换的办法予以防止。

② 调谐频率较低时,调谐电路的带宽会变窄。其结果,会同时听到二个以上广播电台的广播,采用频率变换的办法可以防止这种现象。

③ 无线中继站中采用改变接收波和发射波的频率来防止收发间的干扰。

### ● 调幅收音机的频率变换电路

图 3.60 为超外差式调幅收音机的方框图。从天线进入收音机的电波,在混合电路中与本机振荡电路的信号进行混合。于是,在调幅收音机里,将频率变换成 455kHz,在调频收音机里,将频率变换成 10.7MHz。然后在后面的电路里经过放大、检波后,得到原来的声音。



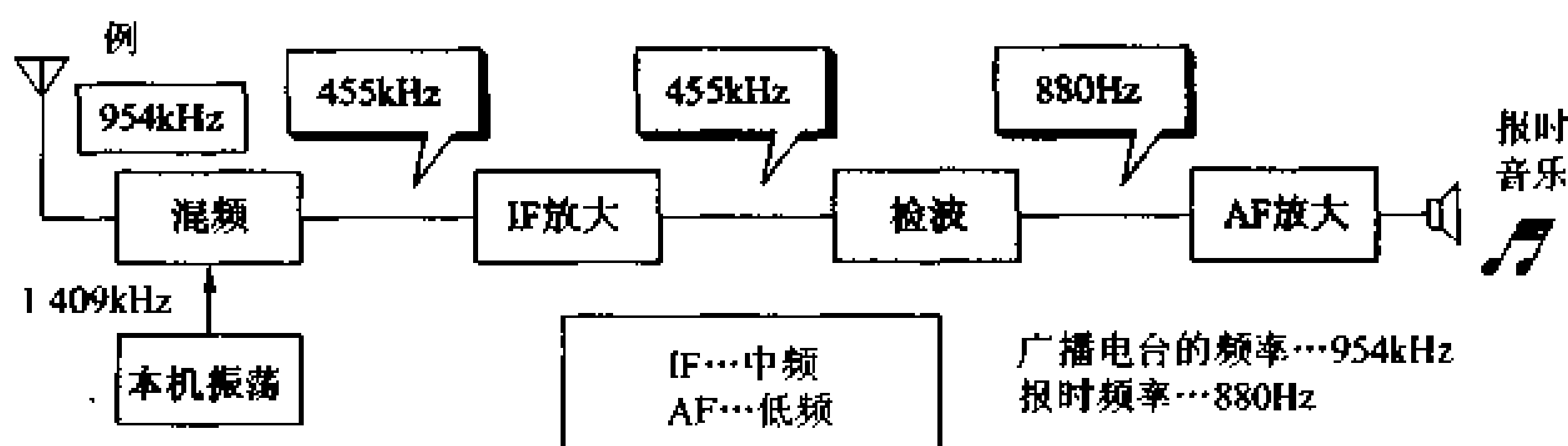


图 3.60 调幅收音机的方块图

图 3.61 给出了频率变换中的混频电路实例。它是用一个晶体管对本机振荡和接收频率进行混频,称其为自激式频率混合电路。来自磁棒天线的电台频率  $f_1$  和本机振荡频率  $f_2$  在晶体管中进行混合。负载线圈与谐振频率为  $f_2 - f_1$  ( $=455\text{kHz}$ ) 的并联谐振电路相连,该电路只选取  $455\text{kHz}$  (它等于  $f_2 - f_1$ ) 的信号进行放大。也就是说,电台发射的电波经过频率变换后送往下一级。调谐频率  $f_1$  和振荡频率  $f_2$  可用双连可变电容器连续调节,而  $f_2$  与  $f_1$  的差始终保持为  $455\text{kHz}$ 。

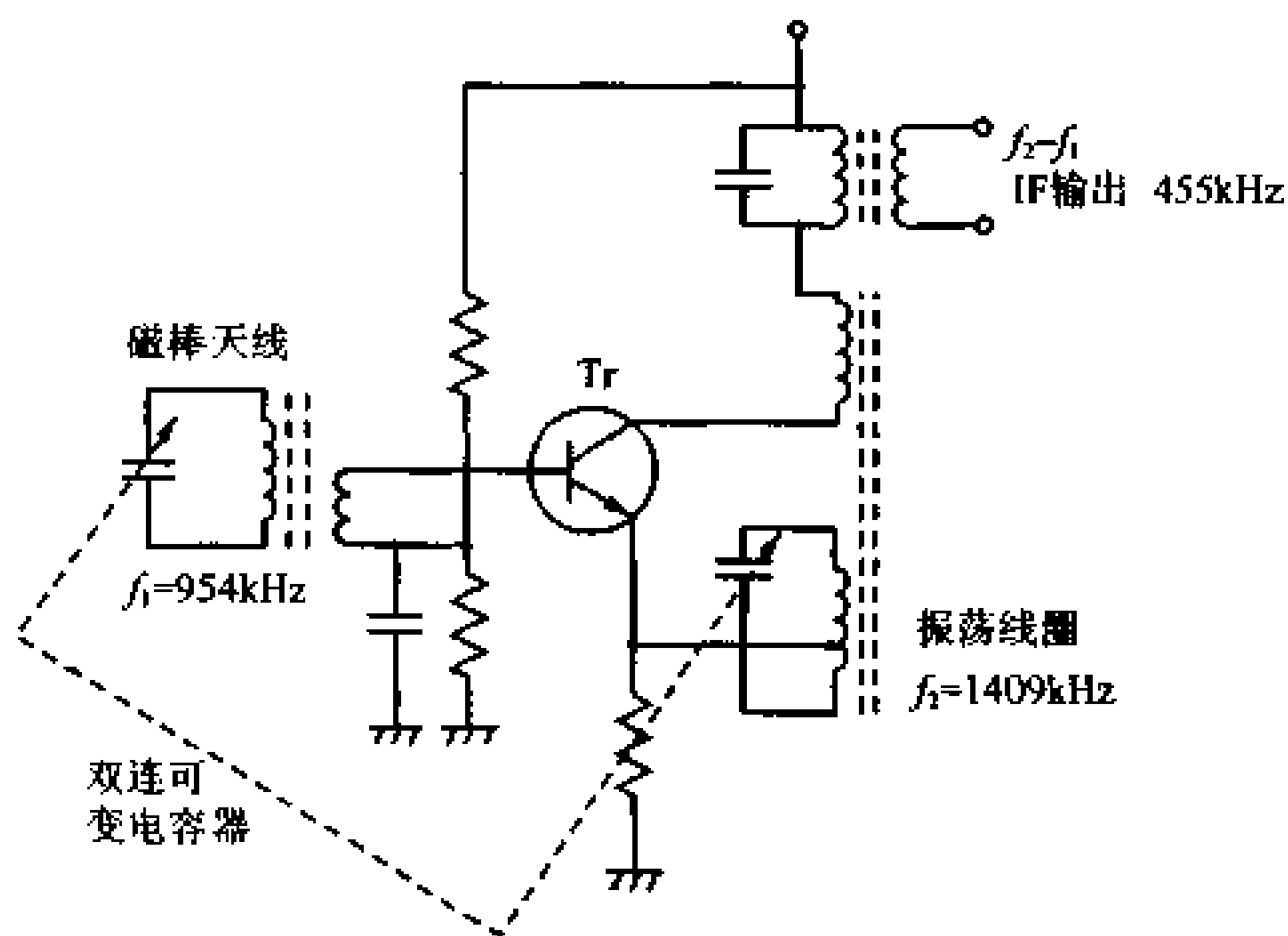


图 3.61 本机振荡和混频电路

# 19 调制电路

## 要 点

把声音等低频信号乘载到作为电波的高频上称为调制。因为这时的高频只起到运送声音的作用,所以,称此高频波为载波。被调制过的高频波称为已调波。

## 解 释

### ● 调幅原理

调幅(AM)是用声音等信号改变高频波振幅的方法。它被用在中波电台和电视图像的调制。图 3.62 给出了 AM 调制电路的例子。

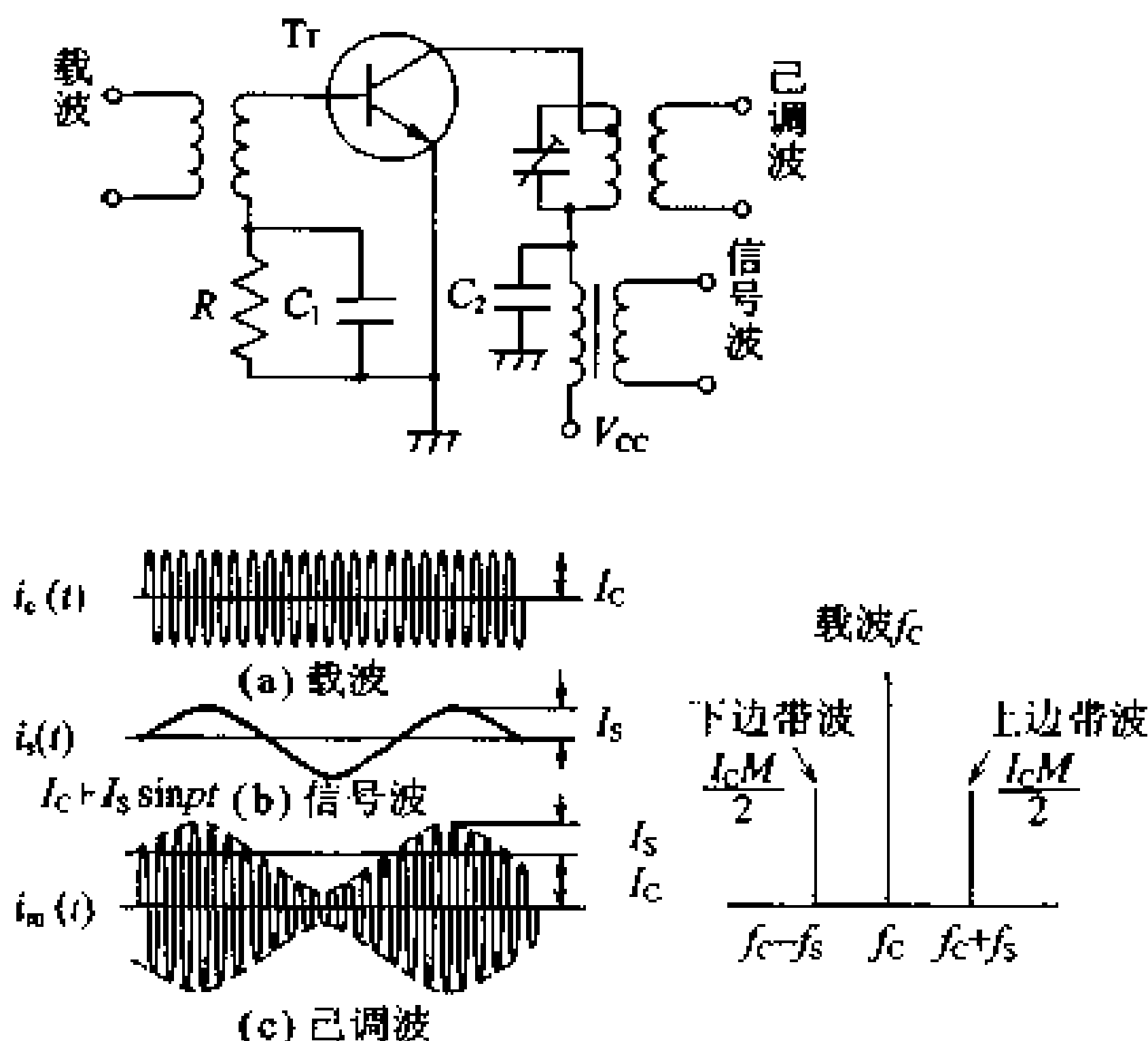


图 3.62 集电极调制电路和已调波及其频谱

假定载波电流为  $i_c$ , 信号波电流为  $i_s$ , 求这时的已调波的电流  $i_m$ 。

$$i_c = I_c \sin \omega t \quad (3.44)$$

式中,  $\omega = 2\pi f_c$  ( $f_c$  是载波的频率)

$$i_s = I_s \sin pt \quad (3.45)$$

式中,  $p = 2\pi f_s$  ( $f_s$  是信号的频率)

如果用  $i_s$  调制  $I_c$ , 则如图 3.62 所示那样, 已调波的最大值按下式变化。

$$I_c + I_s \sin pt \quad (3.46)$$

上式中电流随载波频率而变化, 所以已调波的电流  $i_m$  可以写成下式:

$$i_m = (I_c + I_s \sin pt) \sin \omega t \quad (3.47)$$

$$= I_c \left( 1 + \frac{I_s}{I_c} \sin pt \right) \sin \omega t \quad (3.48)$$

调制度  
调制系数

称上式中  $I_s/I_c$  为调制度, 并用  $M$  表示。另外, 将它的百分比称为调制系数  $Q$ 。令  $I_s/I_c = M$ , 代入式(3.48), 则得式(3.49)。

$$\begin{aligned} i_m &= I_c (1 + M \sin pt) \sin \omega t \\ &= I_c \sin \omega t + I_c M \sin \omega t \sin pt \end{aligned} \quad (3.49)$$

用三角函数展开上式可得下式:

$$\begin{aligned} i_m &= I_c \sin 2\pi f_c t + \frac{I_c M}{2} \cos 2\pi(f_c - f_s)t \\ &\quad - \frac{I_c M}{2} \cos 2\pi(f_c + f_s)t \end{aligned} \quad (3.50)$$

上式的第一项是载波, 第二、第三项分别是下边带波和上边带波。

### ● 调频原理

将用声音等低频信号改变载波频率的调制方式称为调频(FM)方式。如图 3.63(c)所示, 已调波的振幅不变, 而频率随信号波增高或降低。它被用在调频广播里。调频广播占有频带很宽, 因而音质好。图 3.63 是把声音信号加在变容二极管上来改变电容量, 并以此来改变振荡频率的例子。

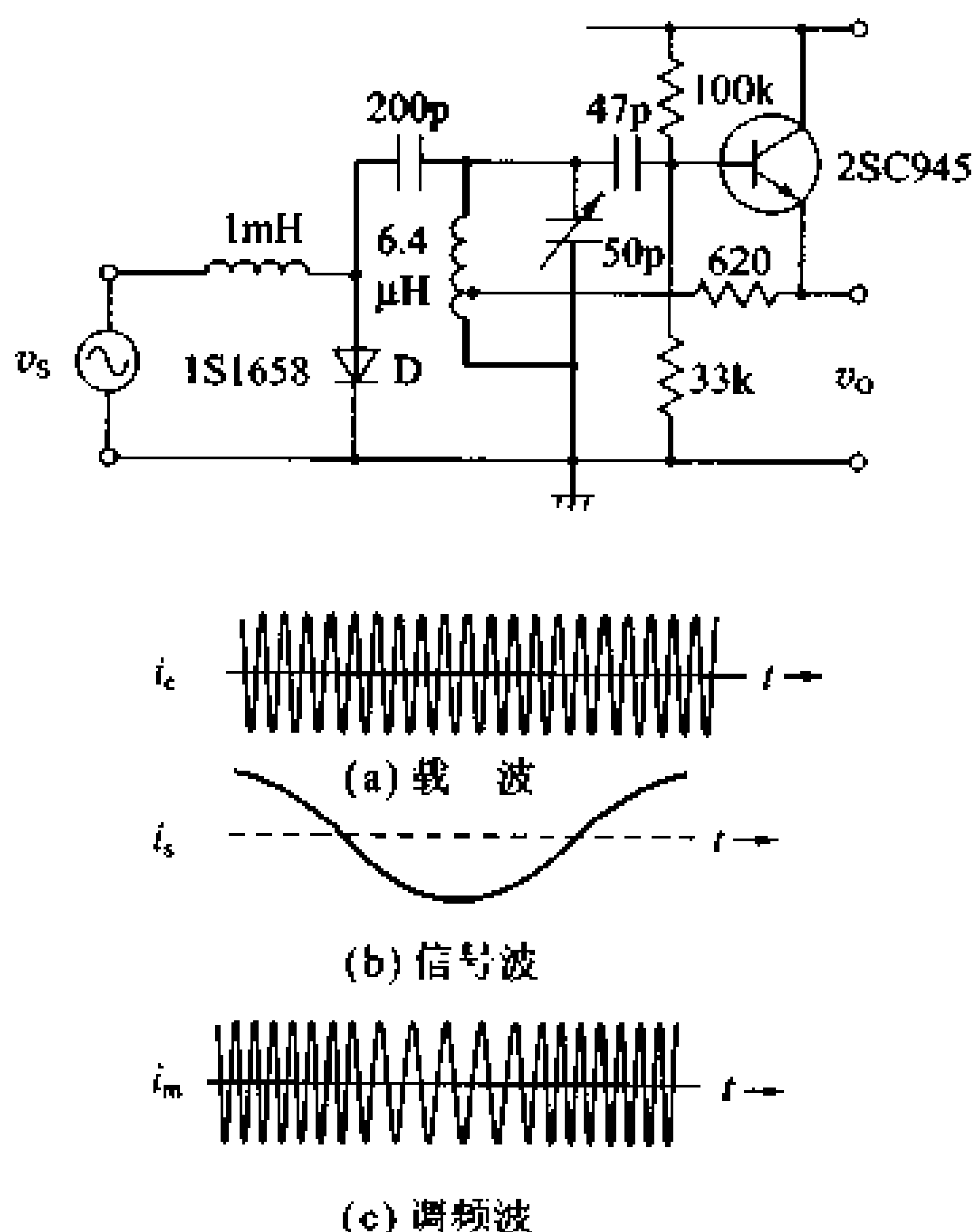


图 3.63 调频电路和已调波

## 单边带调制

## ● 单边带调制的原理

调幅(AM)的已调波具有如图 3.64 所示那样的频谱。由式 (3.50) 可以看出已调波的信号成分中会有上边带波和下边带波, 所以, 即使把载波抑制掉再传送, 信号带仍能再生。不仅如此, 就连把上边带波或下边带波中的一边抑制掉, 信号还是能再生, 这种方式称为单边带(SSB: single side band)调制。

为了得到 SSB 波, 需要有如图 3.64(b) 所示的能抑制载波的平衡调制器和能取出一个边带波的带通滤波器。

这种方式的特点是只使用单边的边带波, 所以占有频率带宽只用  $1/2$  就够了。因此, 能够利用的频道就变为 2 倍。另外, 发射功率也只有 100% 调制的调幅波的  $1/4$ 。但是因为电路变得复杂了, 频带波压缩得很窄, 所以, 常在通信中使用。

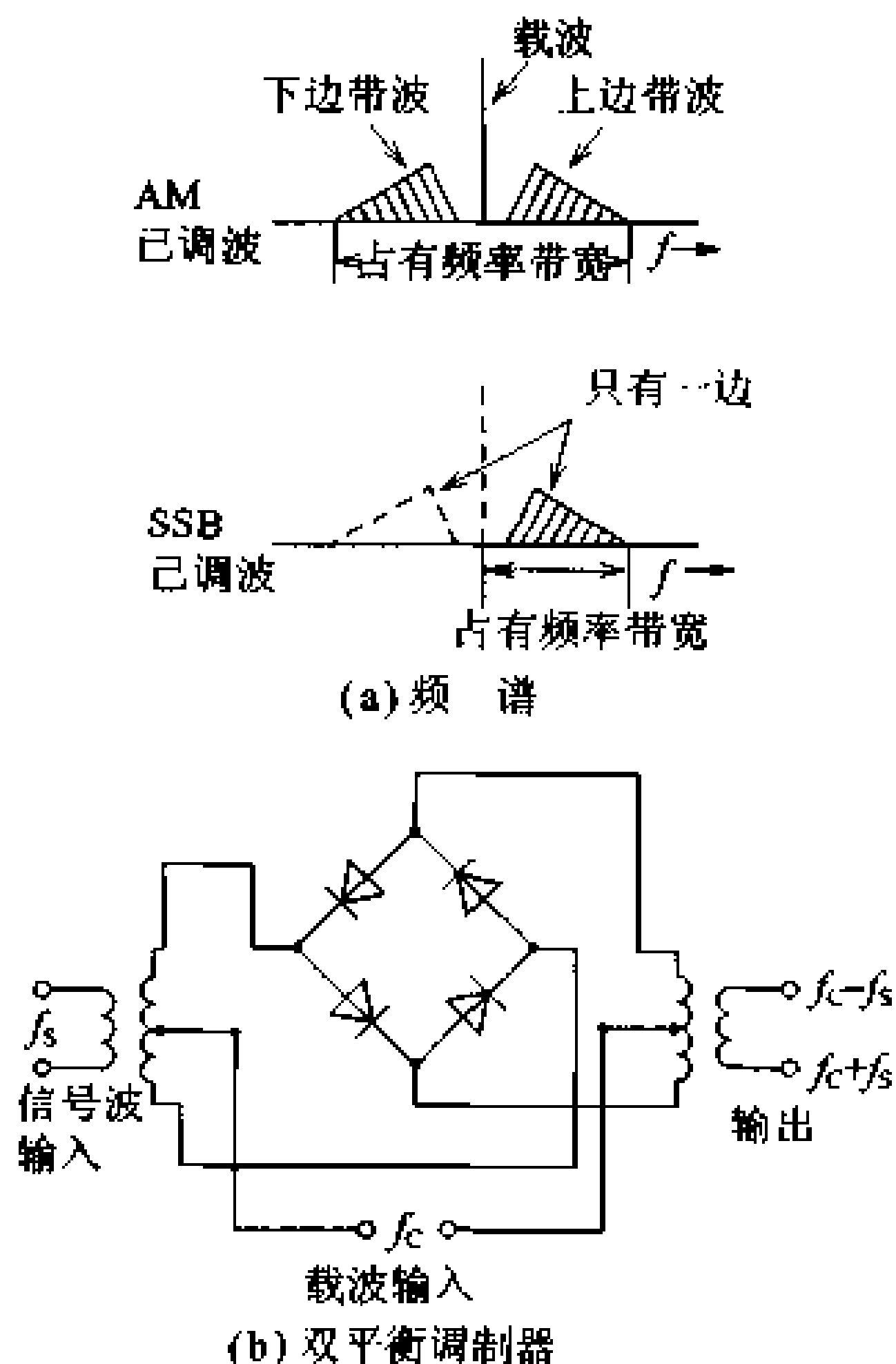


图 3.64 SSB 调制的频谱和双平衡调制器

## 20 解调电路

### 要点

将采用与调制相反的操作,从已调波中取出信号波的过程称为解调检波。解调有 AM 解调和 FM 解调等。解调中一般使用锗二极管。

### 解释

#### ● 调幅(AM)波的解调

将从 AM 已调波取出信号的过程称为 AM 解调,解调也称检波。元件一般是使用锗二极管。它有利用二极管平方特性的平方律检波和利用直线部分的直线检波二种。直线检波可再分为平均值检波和包络线检波。这里讨论包络线检波。图 3.65 给出了解调电路。在这个电路里用二极管进行整流之后,再用 RC 进行滤波,然后再用耦合电容器隔离直流部分来得到所需的信号。

平方律检波  
直线检波  
平均值检波  
包络线检波

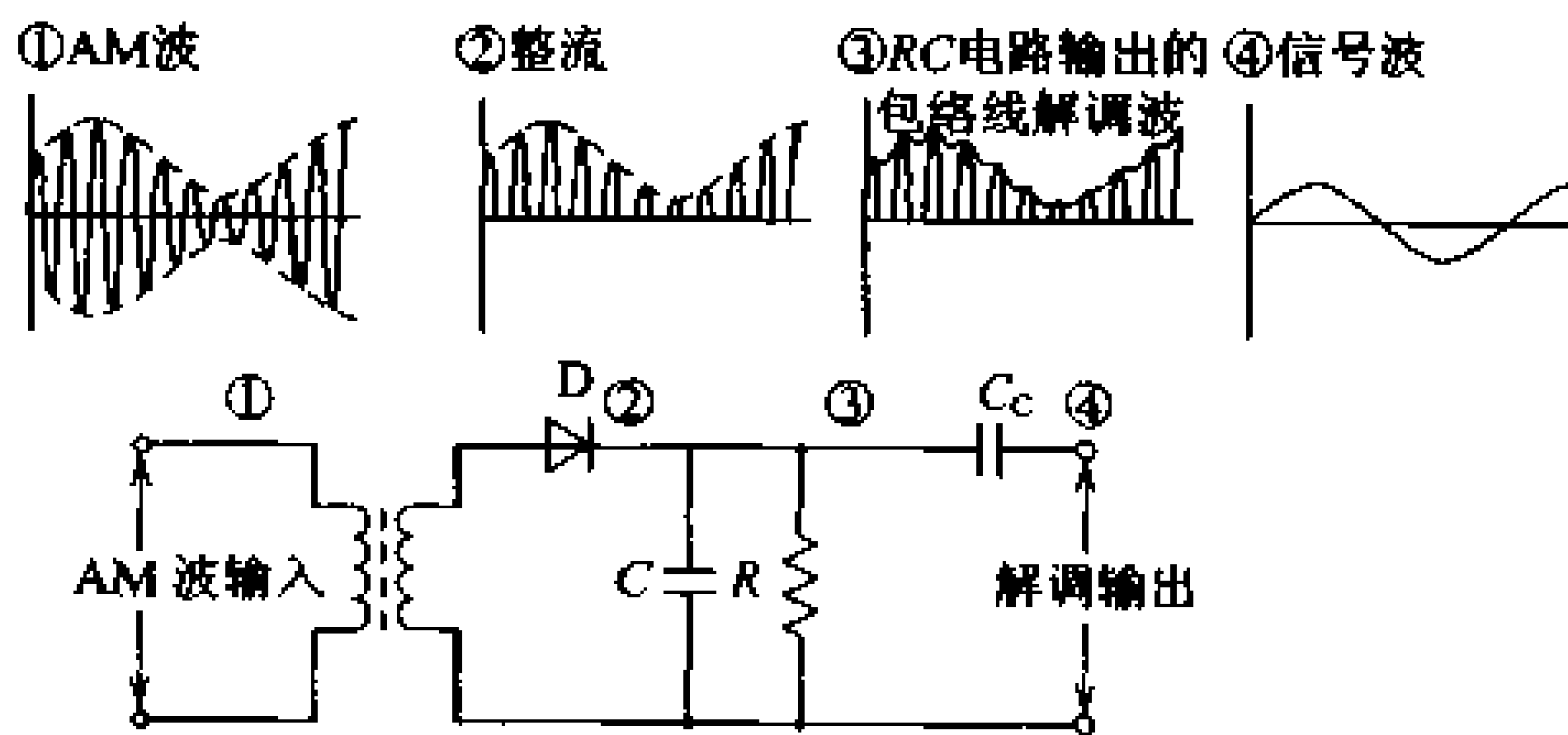


图 3.65 AM 波的解调

#### ● 调频(FM)波的解调

把频率变化变为振幅变化的过程就是 FM 解调。其原理是首先利用谐振电路当频率偏离谐振点时,输出大小就发生变化的特性,把调频波变成调幅波,再对调幅波进行振幅解调来取出信号。图 3.66 所示的双调谐频率鉴别器是由二个调谐电路和二包络线解调电路构成。首先,把 FM 波加到谐振频率已调谐在 FM 波中心频率  $f_0$  的 LC 并联调谐电路上。与 C 相耦合的二个调谐电路的频率分别调谐到比  $f_0$  高的  $f_1$  和比  $f_0$  低的  $f_2$  处。于是,将正向检波和反向检波的输出加在一起,就得到如图 3.66 那样的 S 字形特性的输出。现在假定 FM 输入是未调制的,而且频率为中心频率  $f_0$ 。那么,由于输出相互抵消而成为 0。若频率高于中心频率则输出为正,低于中心频率则输出为负。

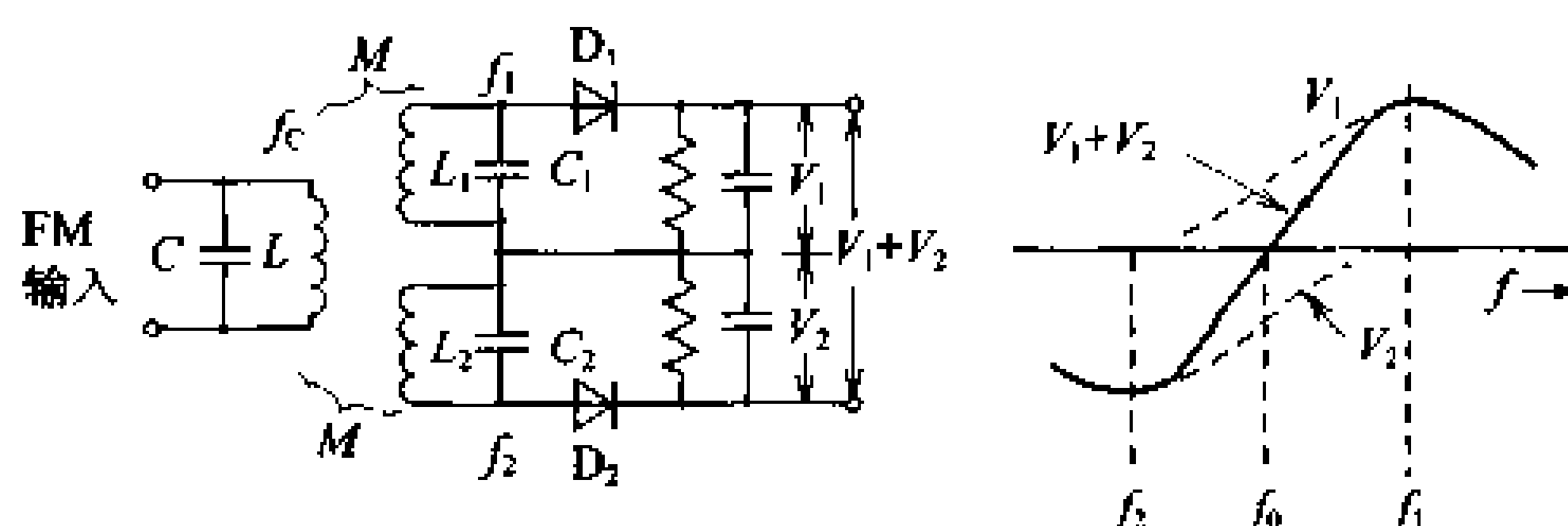


图 3.66 双调谐频率鉴别器

实际上,并不需要特性好、输出大的福斯特-西莱(Foster-Secley)鉴频器和噪声限制电路。而常用的是电路较为简单的比例电路。

图 3.67 给出了比例检波电路。初级和次级谐振频率都设定在 FM 波的中心频率处。如果频率一离开  $f_0$ , 那么,加在  $D_1$  和  $D_2$  上的电压就出现相位差,其合成电压也就不是 0 而有信号电压输出。

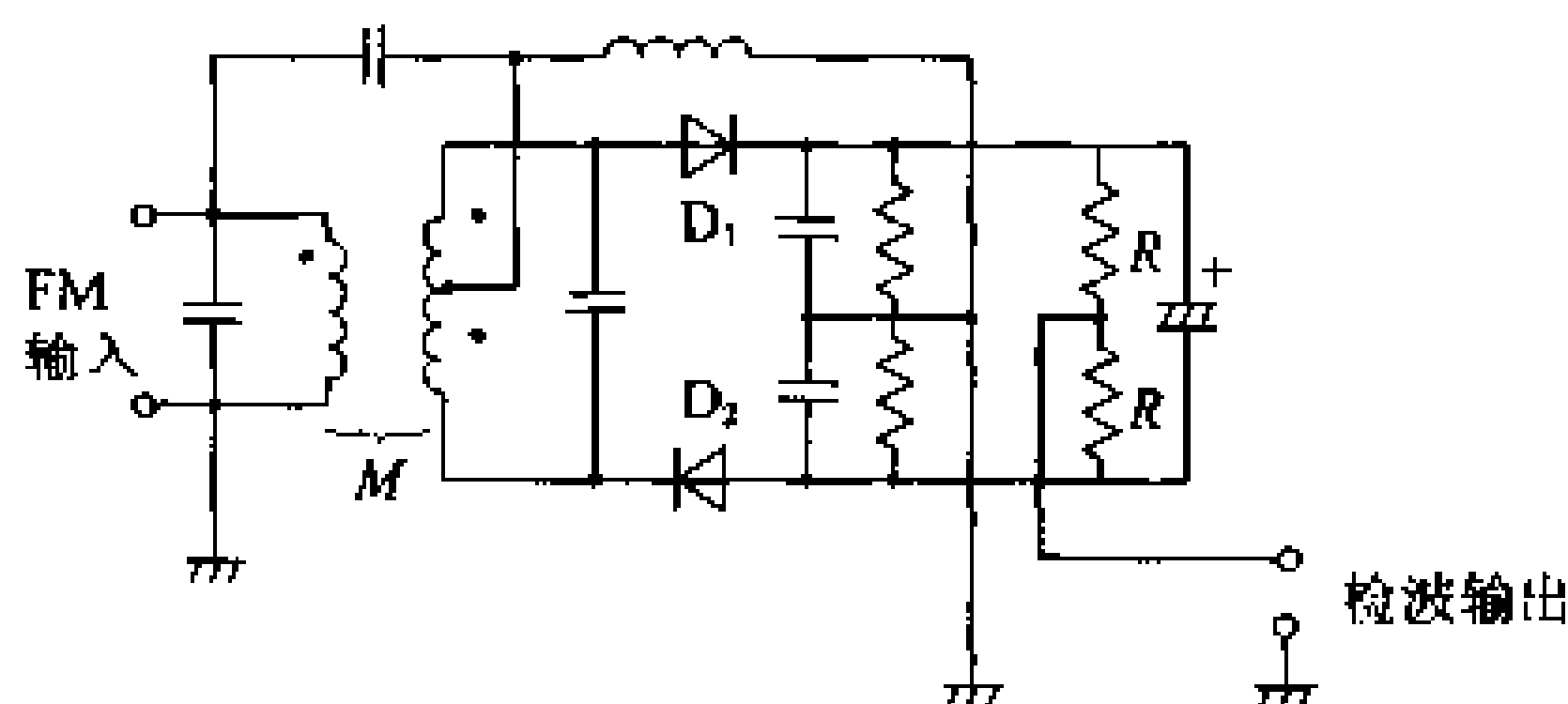


图 3.67 比例检波器

### 例 题 调制度和调制系数

用示波器观测到的 AM 已调波波形和大小如图 3.68 所示。试求这时的调制度和调制系数。

**答** 调制度是用  $M = I_s/I_c$  定义的(参见式(3.48))。调制度  $M = I_s/I_c$  可根据波形用  $(A - B)/(A + B)$  求得。

调制度  $M = (4 - 1)/(4 + 1) = 0.6$ , 请参考:  $A = 2(I_c + I_s)$ ,  $B = 2(I_c - I_s)$

调制系数  $= 0.6 \times 100\% = 60\%$ , (定义参见式(3.48)下边)

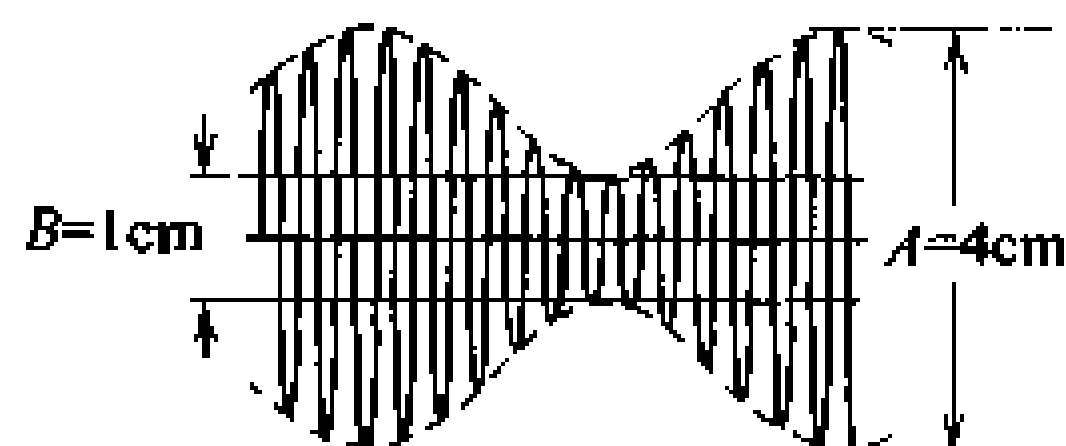


图 3.68 调制系数

## 21 直流稳压电源

### □ 要 点

将交流电变成直流电的电源电路由变压电路、整流电路、平滑电路和稳压电路构成。变压电路用变压器将交流电压变成所需的电压。整流电路用二极管对交流进行整流。平滑电路由电容器将脉动电流变成直流。稳压电路是把直流输出电压稳定化。

用硅二极管将交流变成单方向电流的称为整流。整流有半波整流和全波整流二种。一般多采用效率高的全波整流。

平滑电路是将全波整流所得到的脉动电流再利用电容器充放电特性使其成为平滑直流的电路。

输出电压变化的主要原因有负载变化、电源电压变化、周围温度变化和湿度变化等。当输出电压因上述原因发生变化时,能将其变化检出,并通过反馈使输出电压保持恒定的就是稳压电路。

### □ 解 释 ● 直流稳压电源电路

将交流变成直流的电路称为电源电路。对电源电路的要求是效率高、输出电压稳定。电源电路可分成图 3.69 所示的五个部分。图 3.70 给出了直流稳压电源电路的例子。

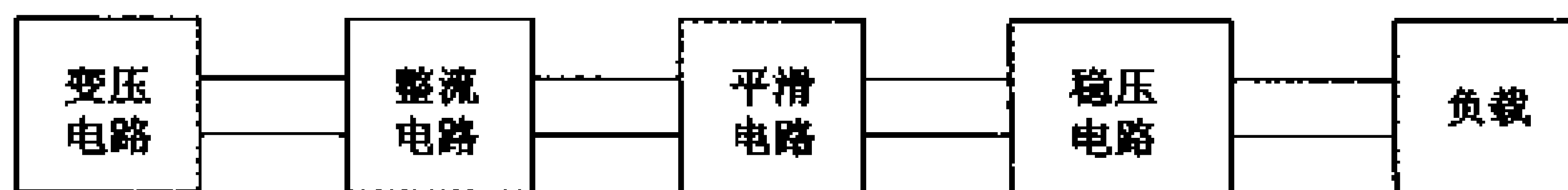


图 3.69 电源电路(直流稳压电源)的方块图

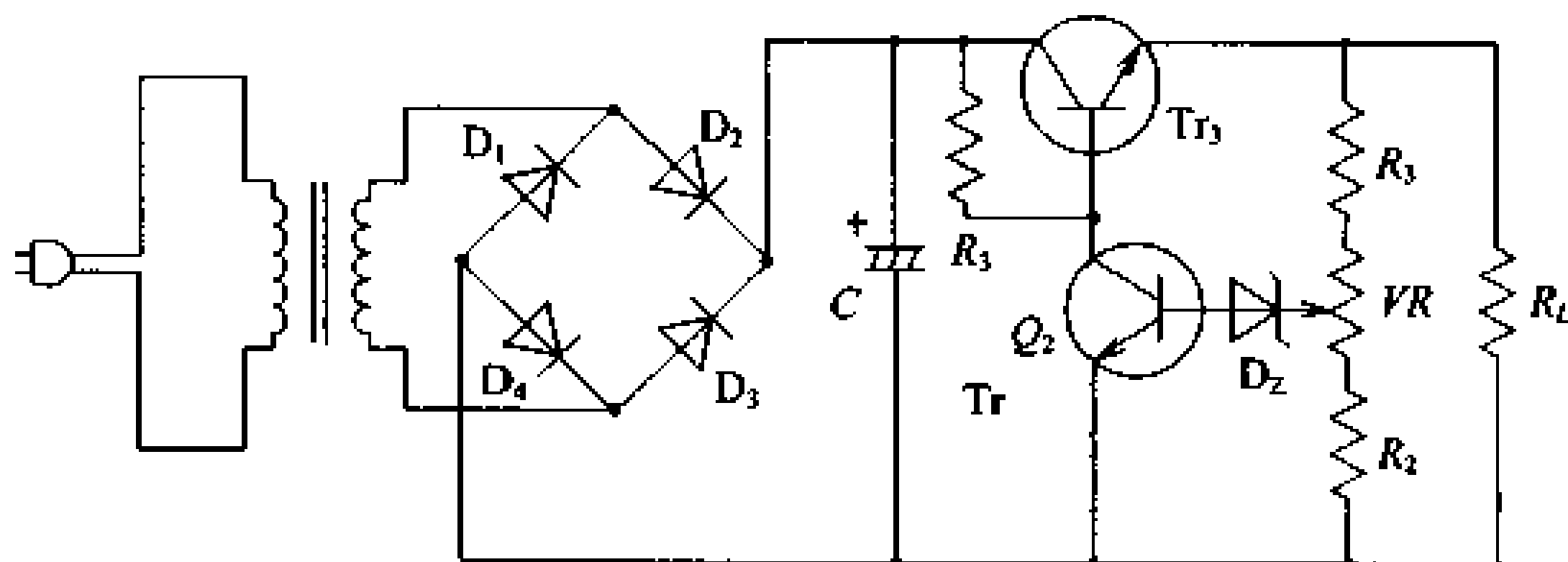


图 3.70 直流稳压电源电路

### ● 整流电路

半波整流电路  
全波整流电路

图 3.71 给出了半波整流电路,图 3.72 给出了全波整流电路。半波整流只利用了交流的半个周期,所以利用效率低、纹波大。而

全波整流利用了交流的全周期,所以,效率高、纹波小。用四个二极管构成的桥式全波整流如图 3.73 所示。虽然用二个二极管就可以实现全波整流,但这需要在变压器的中心点抽头。

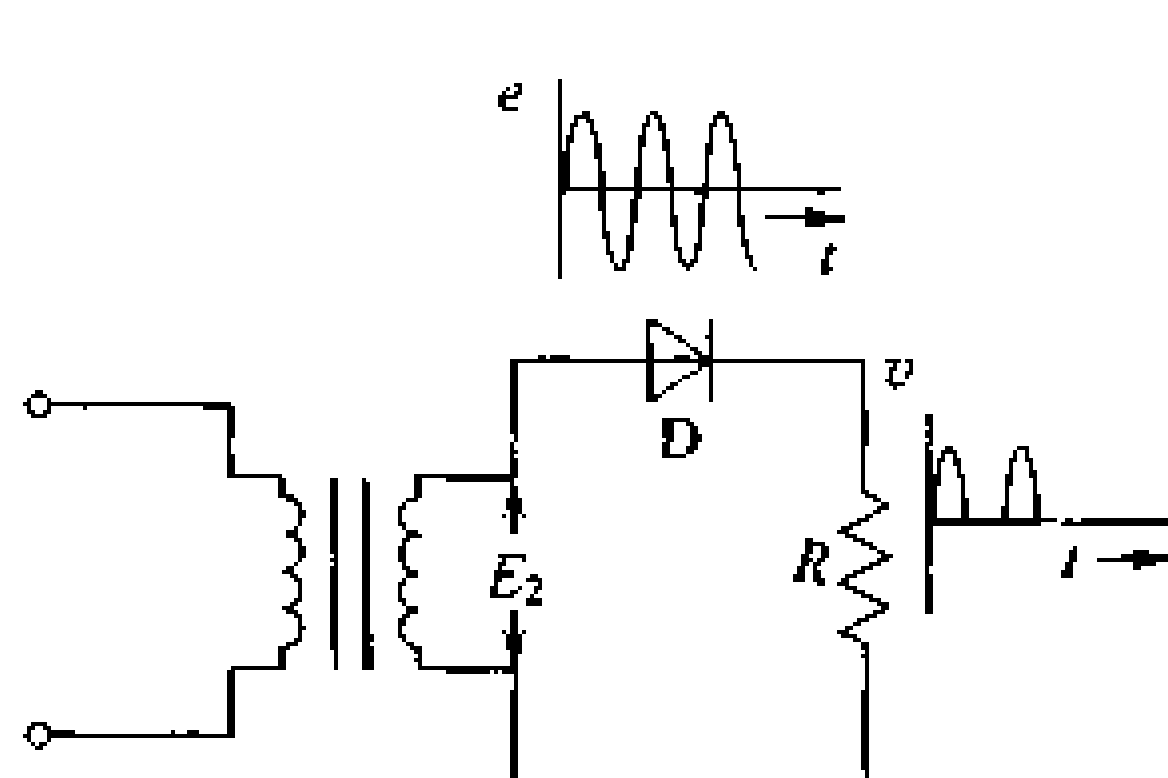


图 3.71 半波整流电路

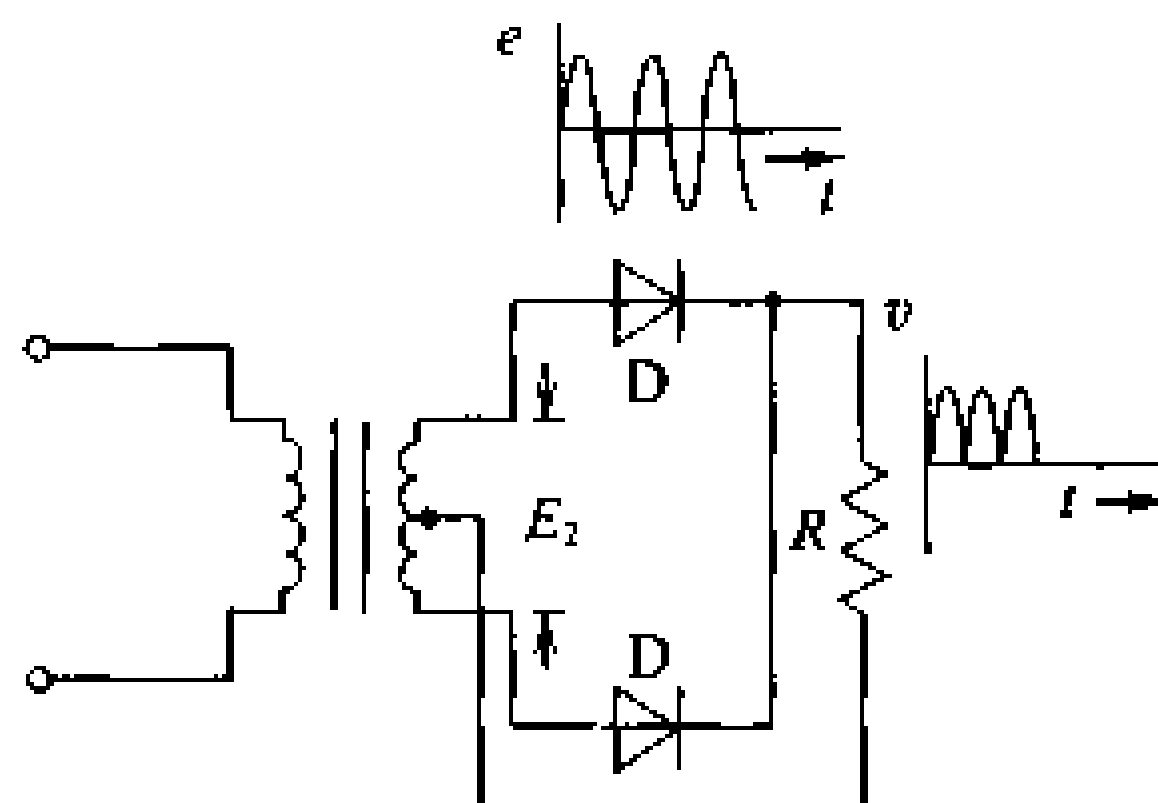


图 3.72 全波整流电路

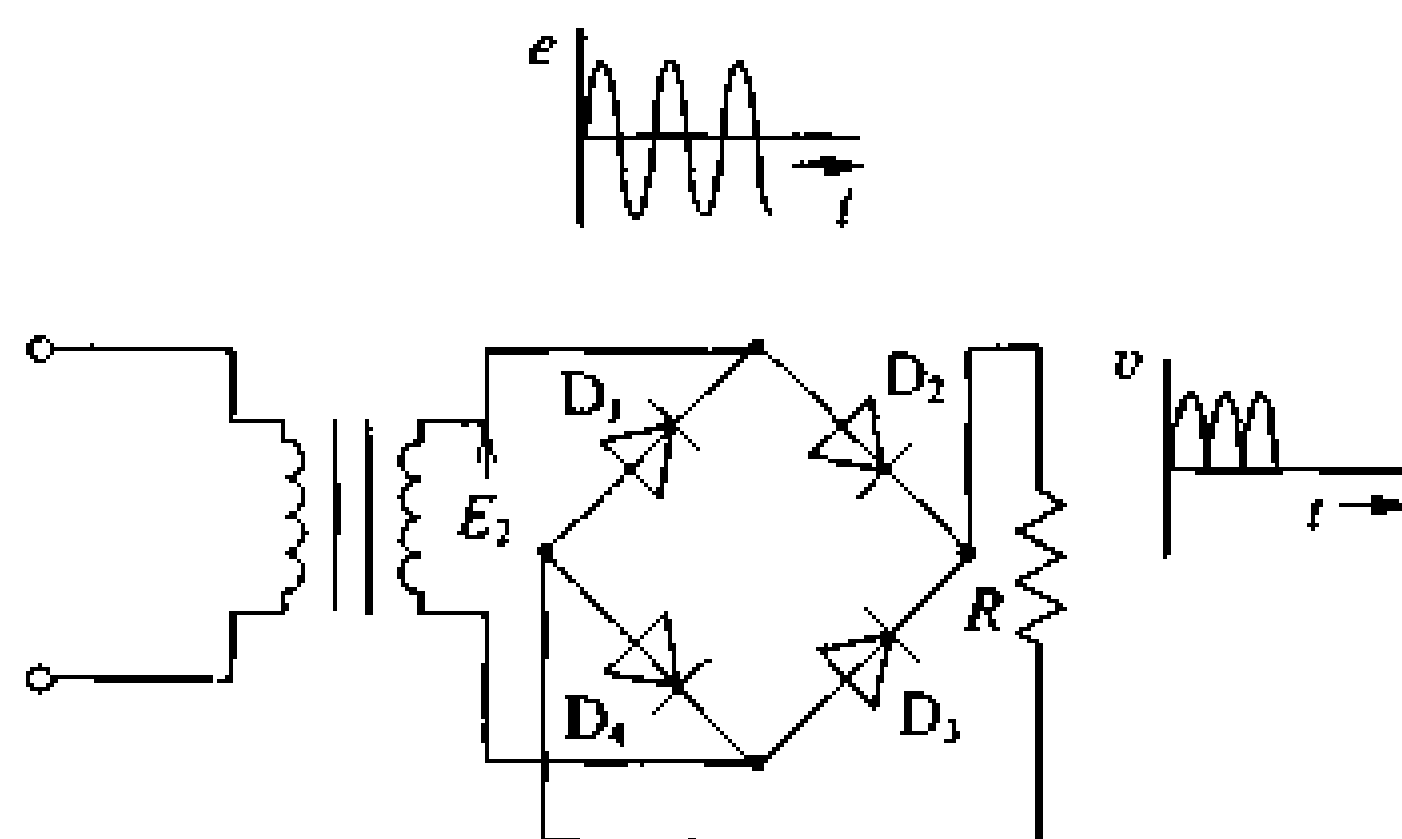


图 3.73 桥式全波整流电路

图 3.74(a)、(b)给出了桥式全波整流电路工作原理的说明。在图 3.74(a)里,  $E_2$  是正半周,  $D_2$ 、 $D_4$  为导通方向,即可形成  $+$   $\rightarrow$   $D_2 \rightarrow R \rightarrow D_4 \rightarrow -$  的闭合电路。这时,负载  $R$  上流过如图中①所示的正半周电流。在图 3.74(b)里,  $E_2$  是负半周,  $D_1$ 、 $D_3$  为导通方向,即可形成  $+$   $\rightarrow$   $D_1 \rightarrow R \rightarrow D_3 \rightarrow -$  的闭合电路。这时负载  $R$  上流过如图中②的负半周电流。

### ● 平滑电路

如图 3.75(a)所示,只经过全波整流的输出电压波形是一排交流峰。如果像图 3.75(b)所示那样,将电容器并联到整流后的负载  $R_L$  上,由于电容器的充放电,交流峰就接近平滑。

由于交流频率很低,只有 50Hz 或 60Hz,所以电容器的容量要大才能使交流峰平滑。这种电容器常使用小型而廉价的铝电解电容器。经过平滑后得到的直流中仍残留有交流成分。表示这种



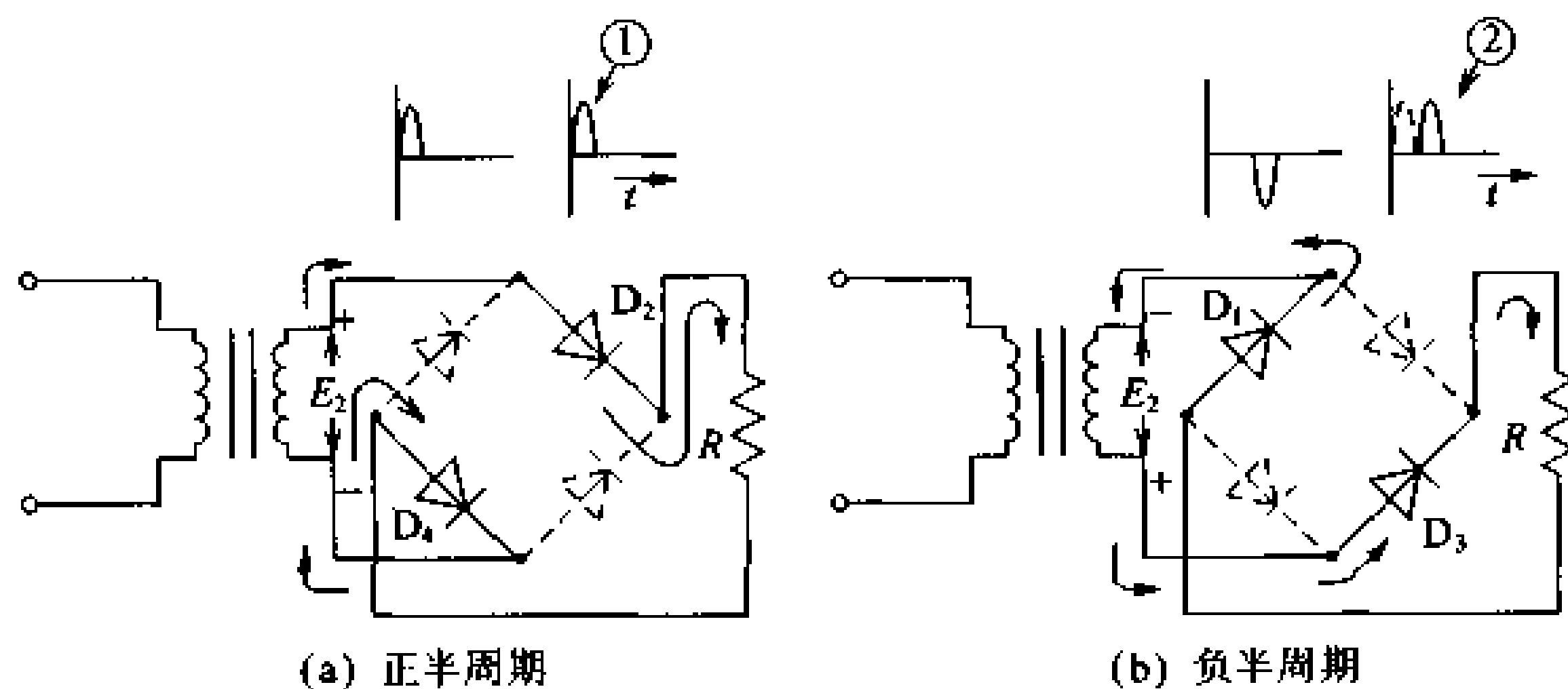


图 3.74 桥式全波整流

纹波系数

交流成分程度的是纹波系数  $\gamma$ , 它可用下式表示:

$$\text{纹波系数 } \gamma = \frac{V_{\text{r-p}}}{V_{\text{dc}}} \times 100\%$$

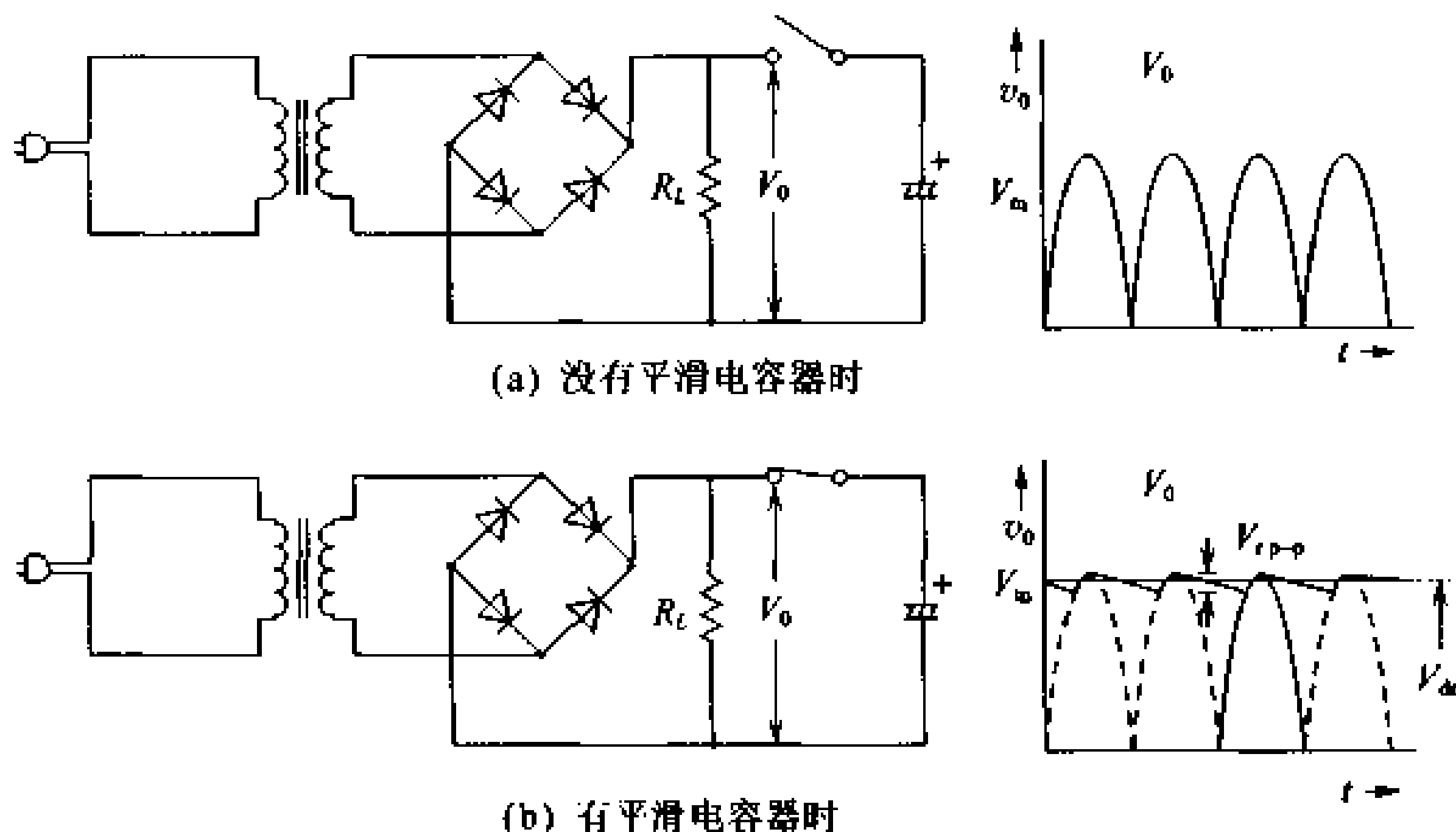


图 3.75 平滑电路电容器的作用

### ● 稳压电路

串联式稳压电路

#### ① 串联式稳压电路

如图 3.76 所示, 输出电压因某种原因下降时, 因为  $V_z$  是恒定的, 所以晶体管  $T_r$  的  $V_{BE}$  上升 ( $V_{BE} = V_z - V_o$ )。其结果, 集电极电流增大,  $V_o$  上升, 又回到原来的电压。输出电压  $V_o$  上升时, 电路

工作的过程与上述过程正好相反。这种电路的缺点是过负载时，晶体管会被烧坏。

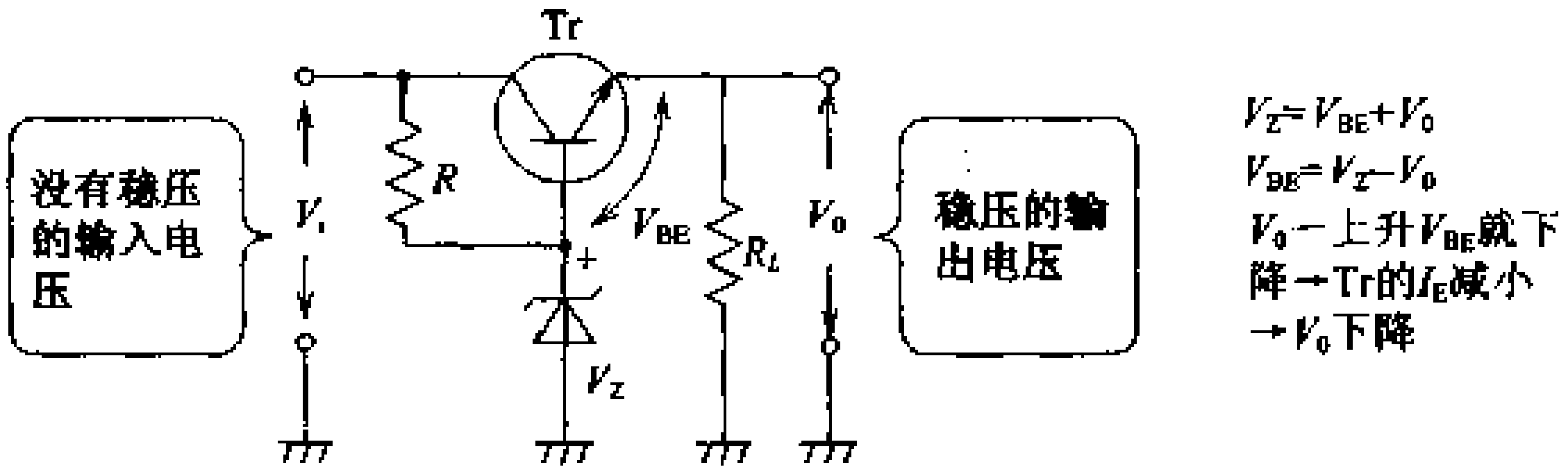


图 3.76 串联式稳压电路

反馈式稳压电路

② 反馈式稳压电路

如图 3.77 所示那样，反馈式稳压电路是把输出电压的一部分 ( $V_2$ ) 与基准电压 ( $V_1$ ) 进行比较，并将其差信号 ( $V_{BE2} = V_2 - V_1$ ) 反馈到  $Tr_1$  进行控制的电路。

输出电压因某种原因上升时， $V_2$  和  $V_{BE2}$  也就上升。其结果， $Tr_2$  的集电极电流增加， $R_3$  上的电压降增大， $Tr_1$  的基极电位下降，于是，输出电压也下降，最终又回到原来的值。

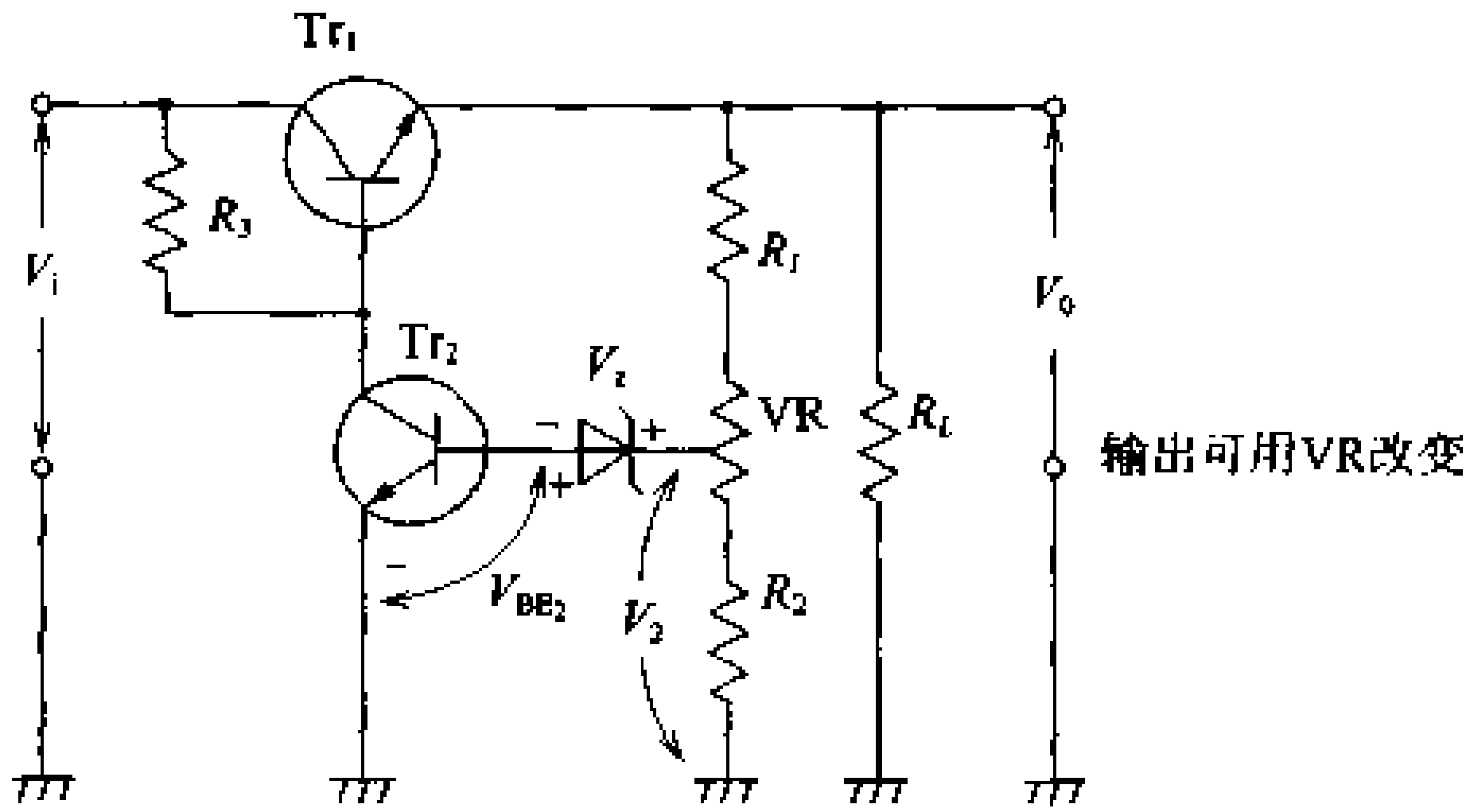


图 3.77 反馈式稳压电路

## 22 开关电源

### □ 要点

开关电源是通过电子开关使输入电压通断交替的办法来得到和输入电压不同的输出电压的仪器。功率效率好,但是输出电压里噪声多。这种仪器有降压式、升压式和反极性输出式等。将直流变成交流的仪器称为 DC-AC 变换器,亦称逆变器。它有间歇振荡式和多谐振荡式二种。给逆变器再接上整流电路,会得到直流这种仪器,称为 DC-DC 转换器。

### □ 解释 ● 开关电源

图 3.78 是降压式开关电源的原理图和输出波形。 $T_r$  是起控制作用的开关晶体管。当输出电压一低于设定值时,差动放大器的输出就反转, $T_r$  导通。在导通状态下,通过  $L$  对电容器充电,输出电压上升。输出电压一超过设定值,差动放大器的输出又反转, $T_r$  截止。于是,储存在线圈里的能量通过二极管流进电容器,再从电容器把功率供给负载。其结果输出电压下降。这种过程不断反复,输出电压得到了调整。由于所得到的输出比输入低,所以是降压式的。

与图 3.76、3.77 的那样连续稳定电压电路相比,这种电路的效率(一般达 90%~95%),起控制作用的晶体管的散热板小,仪器体积小、重量轻,这是好的一面,而不好的一面是输出电压里脉冲性噪声大。

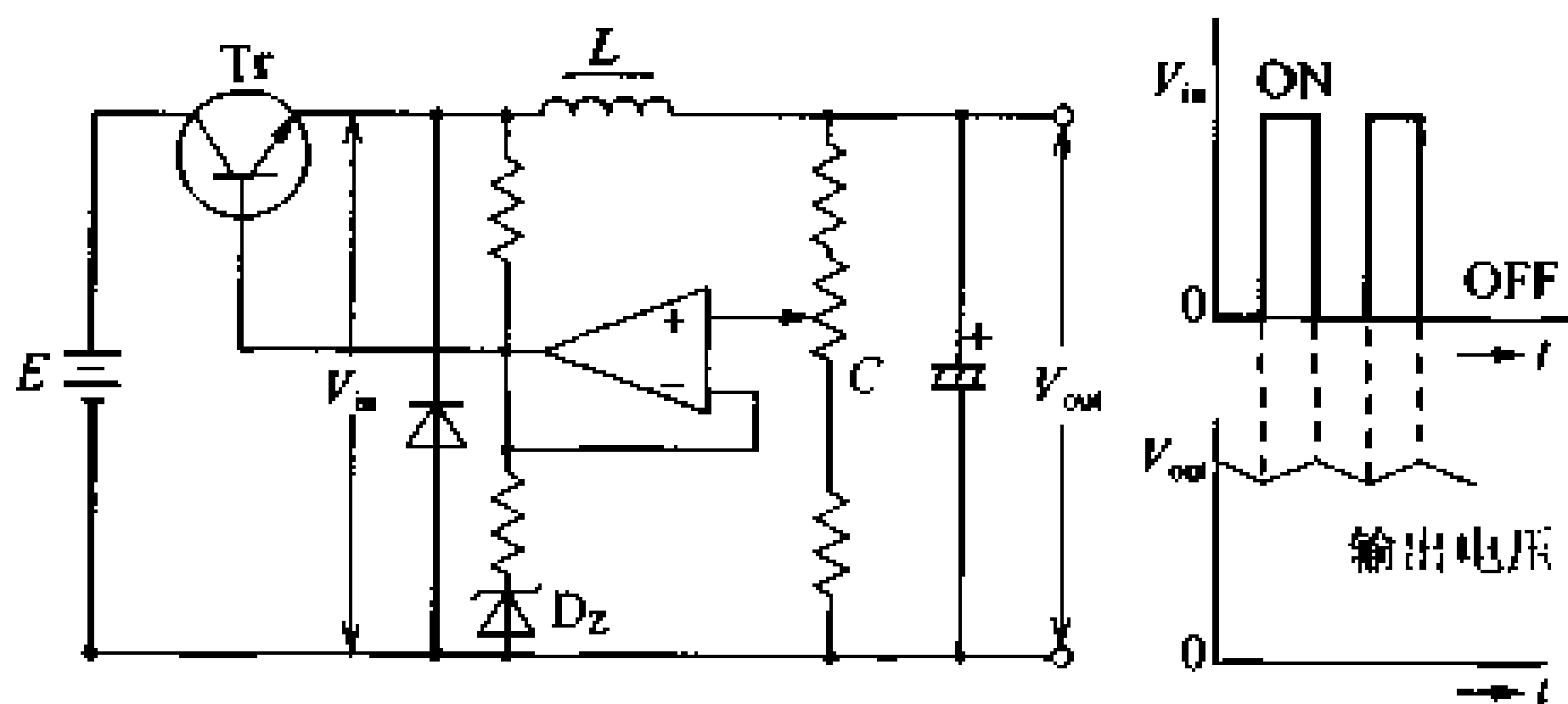


图 3.78 开关电源的原理

### ● 电压变动系数

由于连接了负载,电压比以前无负载状态下变化了多少?把这个电压变化的比例称作电压变动系数。电压变动系数  $\epsilon$  可用下式表示。这里假定  $V_0$  为无负载时的输出电压, $V_2$  为额定负载时

的输出电压,则电压变动系数 $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100[\%]$$

## □ 相关知识 ● DC-AC 逆变器

图 3.79 给出了间歇振荡式逆变器的原理图和电路。它是通过反复开闭初级线圈上的直流电源开关使直流时通时断而变成交流的方法,开关的工作由晶体管来进行。效率 $\eta$ 为 50%~80%,使用频率为十几千赫。

图 3.80 给出了多谐式逆变器的原理图和电路。它通过二个开关的交替通断,使直流时通时断而变成交流电的方法。由于流过变压器的电流方向是交替改变的,所以防止了变压器被直流磁化。这种多谐式逆变器的效率在 80%左右,频率是几千赫。如果给变压器次级再接上整流电路,就成了 DC-DC 转换器。

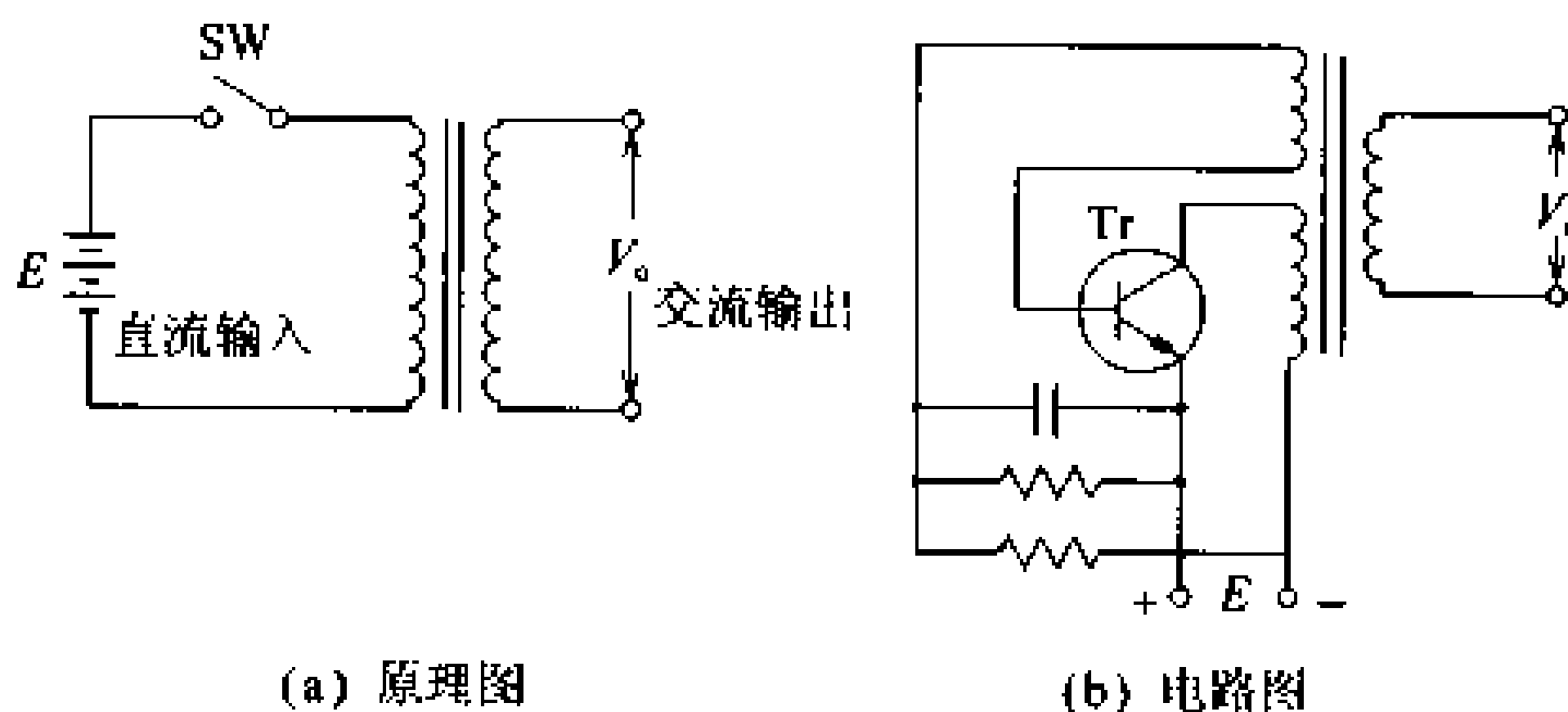


图 3.79 间歇振荡式逆变器的原理图和电路图

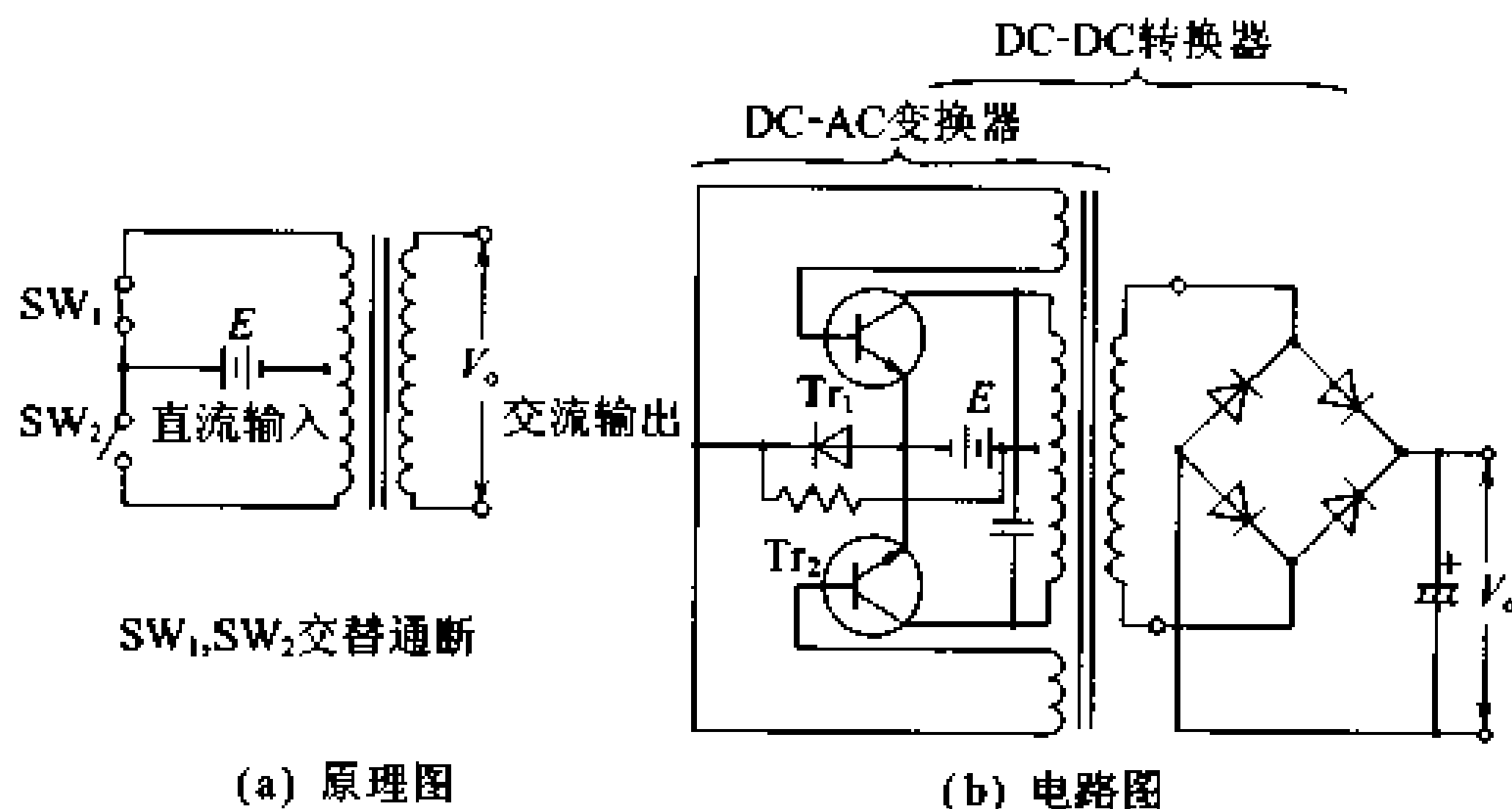


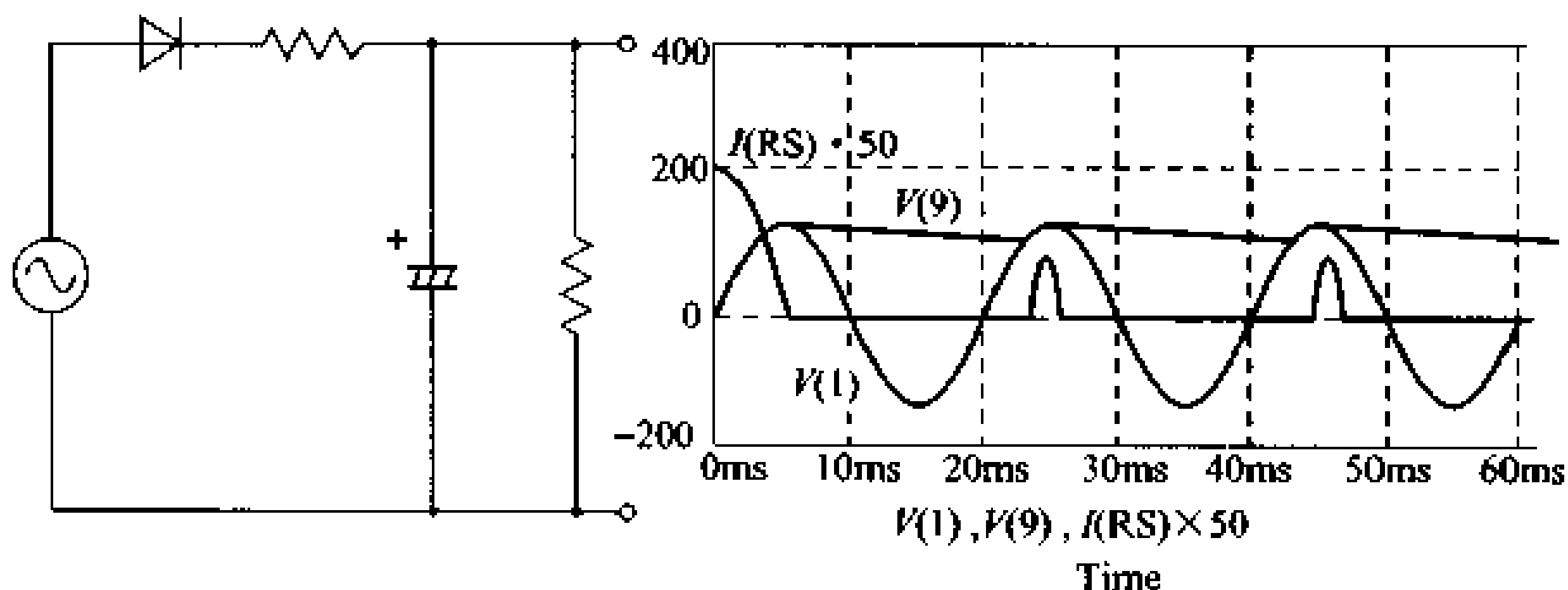
图 3.80 多谐振荡式逆变器的原理图和电路图

## 电子电路的仿真

现在可不用进行实验,使用计算机就可能知道电路的状态。这可大大缩短电路设计的时间。其代表是被叫做 Spice 的仿真软件。下边介绍一个电路的分析例子。图(a)是电路图,图(b)是其结果。

改变电路元器件参数值由编程器输入。图(c)为其输入清单的例子。试比较一下电路图和输入计算机的数据以及由此所得到的结果,就可看出它们间的关系。

Spice 是美国加利福尼亚大学柏克莱分校开发的电子电路仿真器。



(a) 电路(半波整流)

(b) 输出波形的结果

## REC1-RECTIFIER/HALFWAVE ANALYSIS

.TRAN 10US 60MS

.MODEL DIS800 D(Is=0.1p Rs=0.2 CJO=2p Tt=12n Bv=1000 Ibv=0.1p)

V1 1 0 SIN(0 141.4 50)

D1 1 2 D1S800

RS 2 9 10HM

C1 9 0 100UF

R1 9 0 1KOHM

.probe ; \*ipsp\*

.END

A

V(1),V(9),I(RS)\*50

(c) 输入计算机的电路参数

图 仿真软件例

## 第4章

# 脉冲数字电路

我们的生活，的确是让许多电子机器包围着。像电视机、录像机、传真机、录音电话等等，数也数不清。这么多电子机器的构成技术也就是电子技术，其中，计算机、电视机以及通信等领域的基本电路的构成技术则是脉冲电路和数字电路技术。

本章首先介绍作为脉冲电路基础的多谐振荡器、施密特触发电路以及整形电路等，以便理解有关脉冲的基础知识及工作原理。其次，考虑到与脉冲电路的密切关系，也对作为数字电路基础的二进制数及布尔代数也进行了介绍，并讲解了逻辑电路基础以期理解其工作原理。后面的第6章讲述的是信息技术，第7章讲述的是电子控制基础，这两章中有不明白的地方时，希望回过头来学习本章。

- 责任编委

扇 浩治

- 执 笔

扇 浩治(1~8)

黑木启之(9~16)

柴崎年彦(17~26)

# 1 脉冲波

## □ 要 点

电子电路中,持续时间短、间歇变化的电压或电流信号,称为脉冲波。

脉冲波属于非正弦交流信号。数字电路中使用的脉冲波有方波、三角波等。

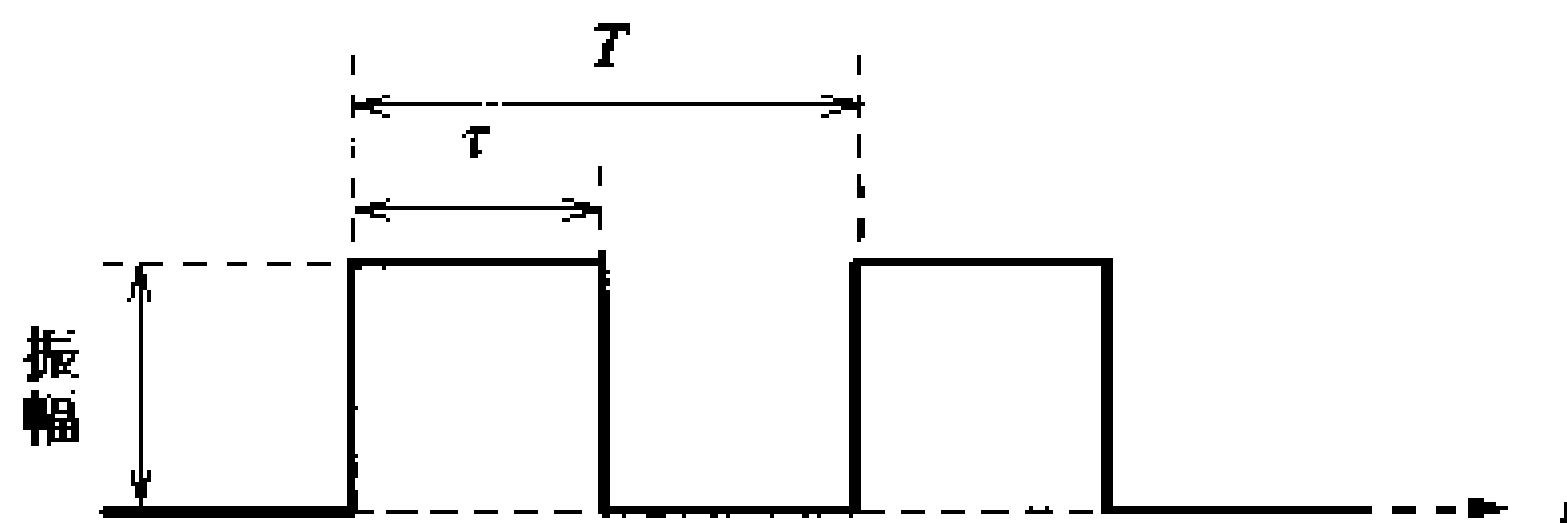
## □ 解 释

方波

### ● 脉冲波基础

这里以方波为例作一说明。如图 4.1(a)所示,此波形为以一定的时间间隔重复的脉冲,因而称为周期脉冲。经常使用这种完整理想的波形仅仅是为了处理上的方便,实际波形并非如此。

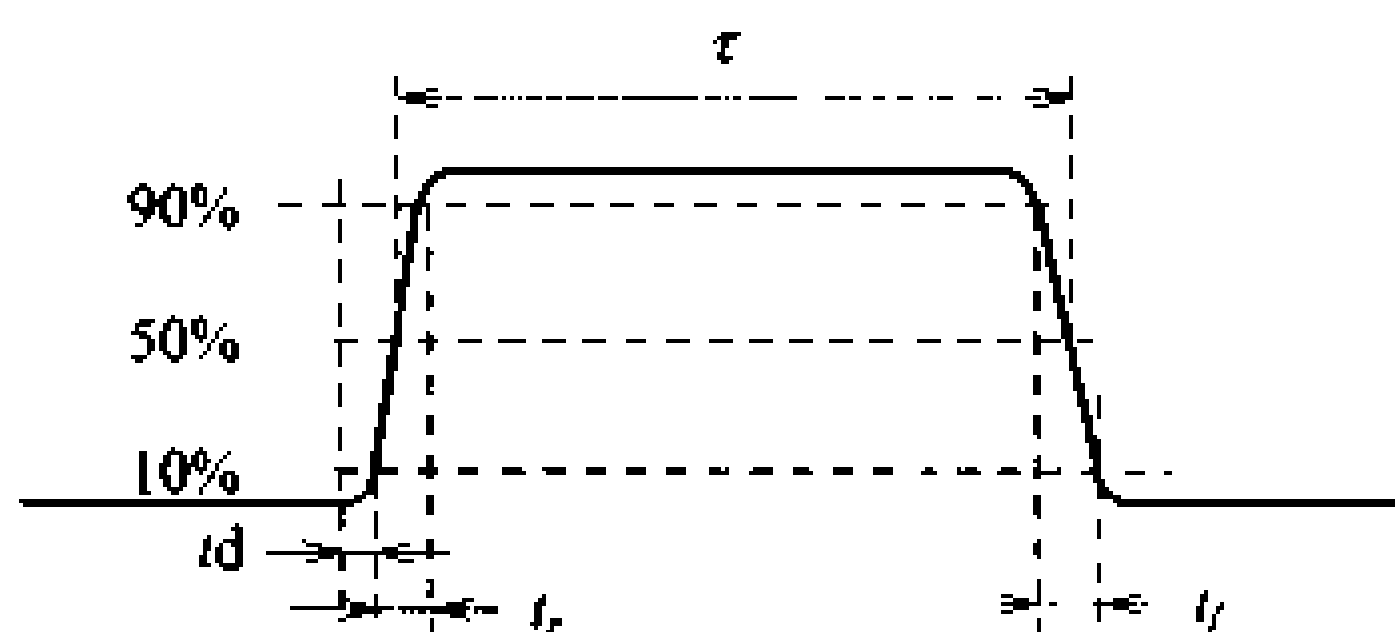
图 4.1(b)给出了实际脉冲波的例子。其上升沿和下降沿比理想波形平缓,过渡处均带有圆角。这是由于电路中电容电感的影响所致。



$T$ : 重复周期[s]

$\tau$ : 脉宽[s]

(a) 理想方波



(b) 实际方波

图 4.1 方波脉冲

### ● 脉冲波种类

图 4.2(a)~(g)示出了电子电路中经常要处理的脉冲波。其中方波各部分的名称和主要术语定义于表 4.1 中。

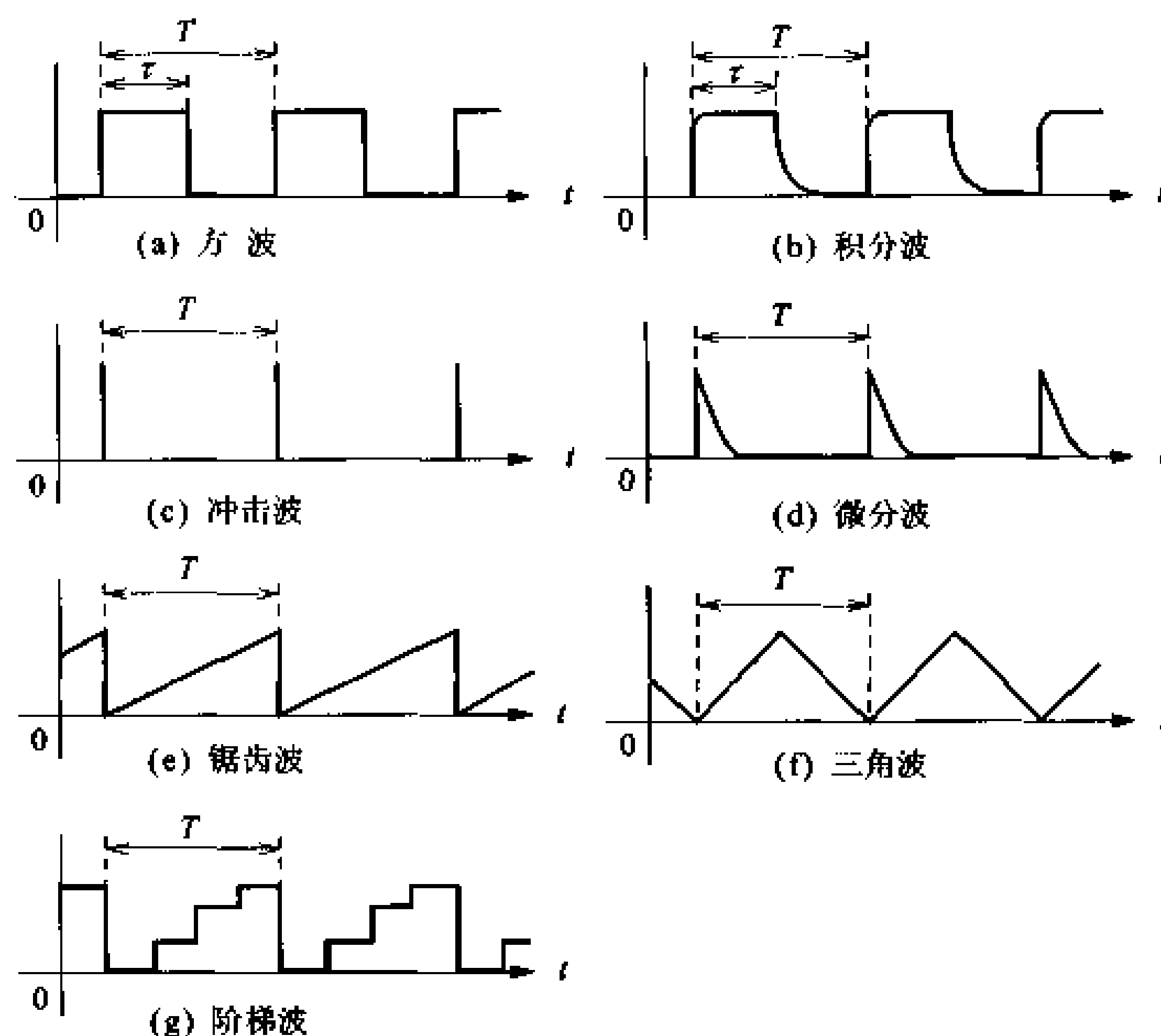


图 2 各种脉冲波

表 4.1 方波脉冲各部分的名称和主要术语

名称术语	符号和单位	内容说明
振幅	$V[V], I[A]$	用最大值表示
重复周期	$T[s]$	到下一相同波形出现的时间
重复频率	$f[Hz]$	重复周期的倒数 $f=1/T$
脉冲宽度	$\tau[s]$	脉冲持续时间
占空比	$D$	$D=\tau/T$
上升时间	$t_r[s]$	振幅从脉冲 10% 上升到 90% 的时间
下降时间	$t_f[s]$	振幅从脉冲 90% 下降到 10% 的时间
延迟时间	$t_d[s]$	振幅从脉冲 0 上升到 10% 的时间
存贮时间	$t_s[s]$	输入脉冲終了到输出脉冲达到其振幅的 90% 所需的时间



## 2 开关电路

### □ 要 点

在执行开关动作的开关电路中,有使用二极管的,有使用晶体管管的。

开关动作,指的是对输入脉冲的响应,因而也称为脉冲响应。

### □ 解 释 ● 二极管开关

如图 4.3(a)所示,输入端加正向电压时,电路导通(ON)电流流过。这与开关的闭合状态相同。而如图 4.3(b)所示,输入端加反向电压时,电路断开(OFF)几乎没有电流。这与开关的断开状态相同。

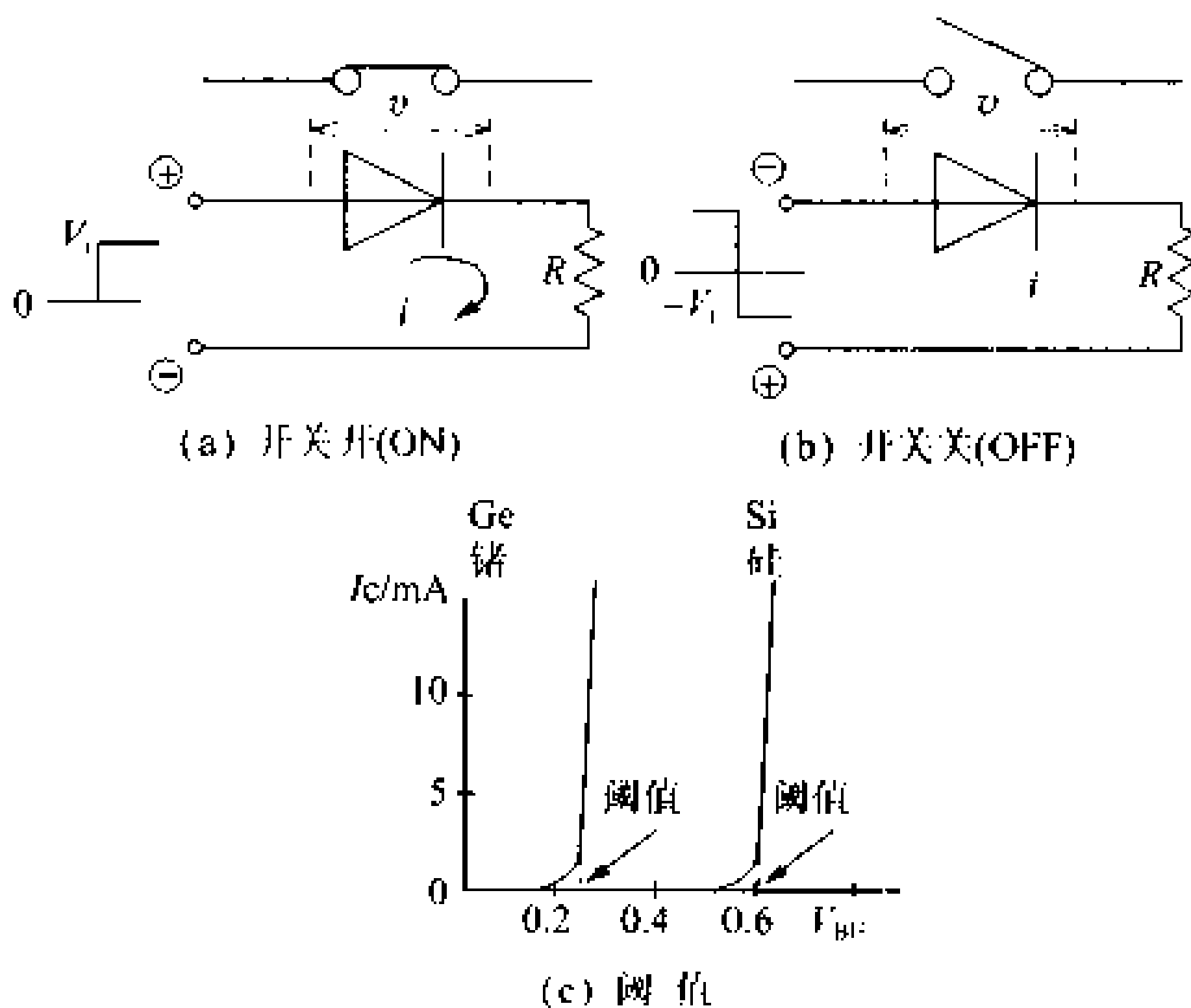


图 4.3 二极管开关及其阈值

正向恢复特性  
反向恢复特性  
阈值

少数载流子存  
贮效应

脉冲电路的问题是,对于输入信号、输出信号响应的快慢。为考察响应速度,应该研究一下二极管的正向恢复特性和反向恢复特性。二极管的脉冲响应情况显示在图 4.4 和图 4.5 中。这里, $V_i$  为阈值。电压到  $V_i$  以上时,如图 4.3(c)所示,正向电流开始流过。最终管子的压降仍为  $V_i$ 。图 4.5 中, $t_s$  称为存储时间,它是为了将因少数载流子存储效应而积累起来的少数载流子释放消散而需要的时间。

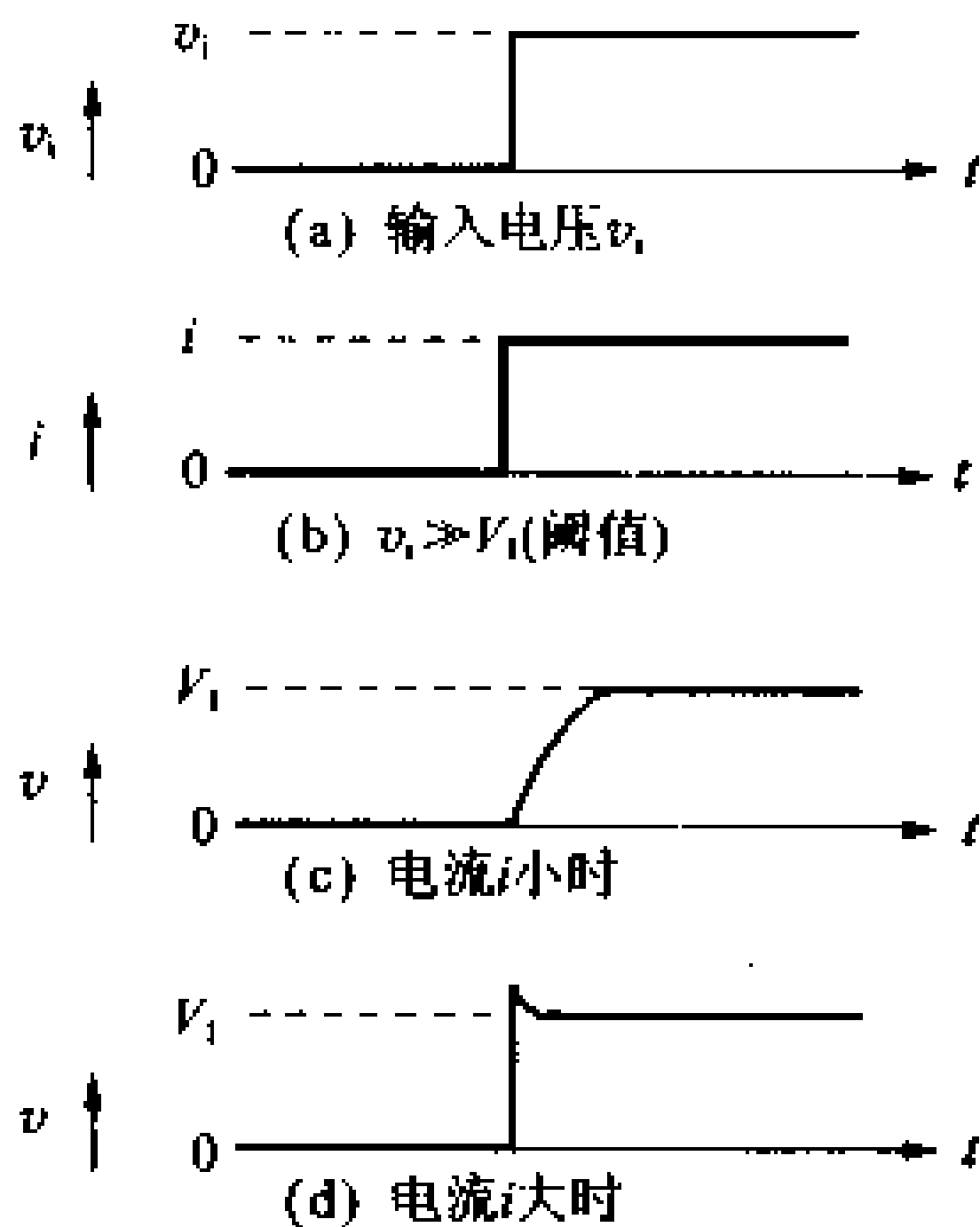


图 4.4 正向脉冲响应

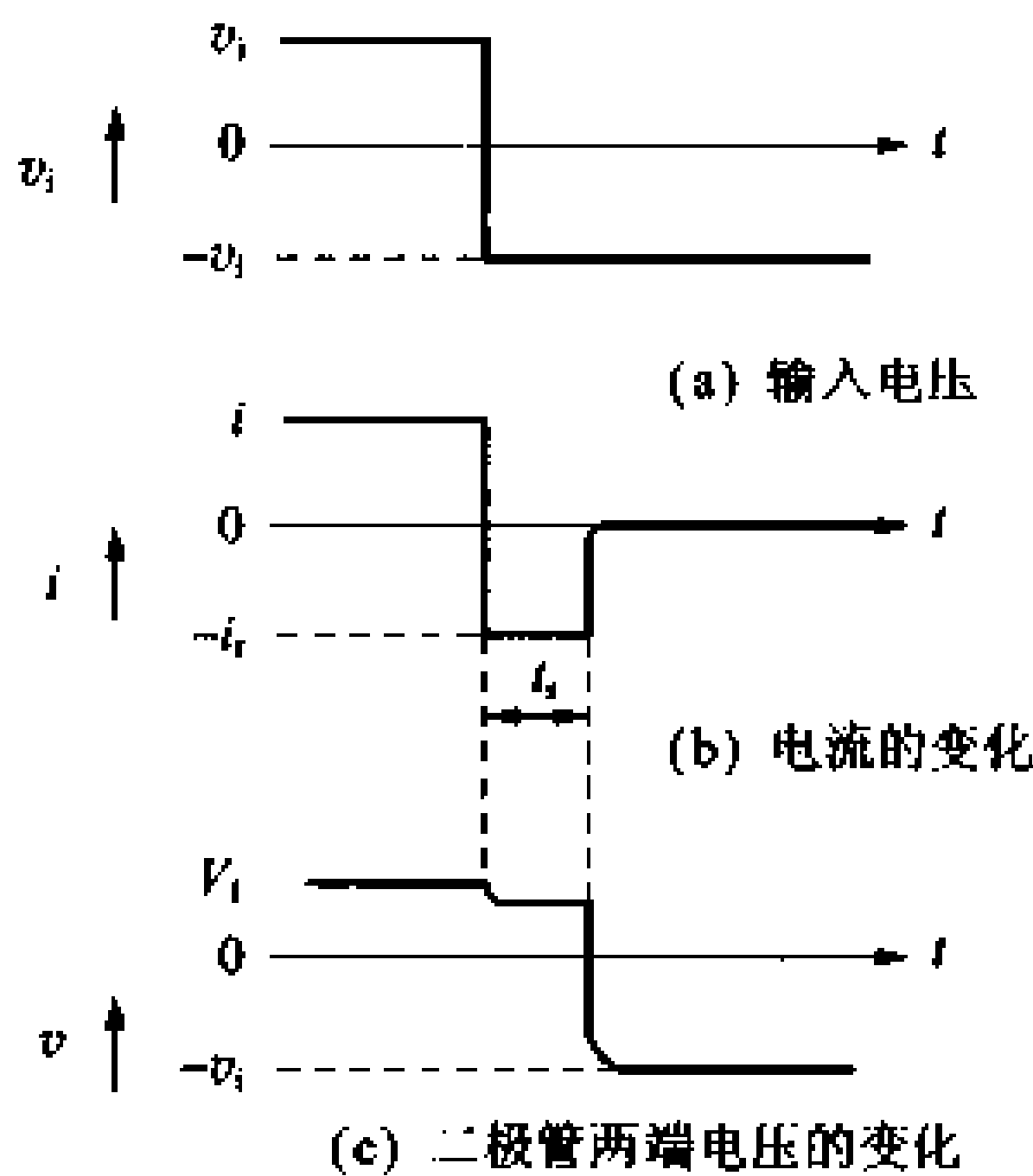


图 4.5 反向脉冲响应

● 晶体三极管开关

三极管开关

图 4.6 示出的是晶体三极管开关电路的例子及管子的输出特性,图 4.7 则给出了其对于脉冲输入的响应。如图 4.6 所示,输入端正电压增加时,基极有电流  $I_B$  流过,集电极则开始有输出电流,集电极和发射极之间呈导通状态(ON)。因此,输出电压几乎为零。这与合上开关的状态相同,也叫做输出低电平(L)。这时,与输入电压  $V_i$  的上升变化相比,集电极的输出电流和输出电压的变化则稍微会延迟出现。这一延迟时间称为开启时间  $t_{on}$ 。

开启时间

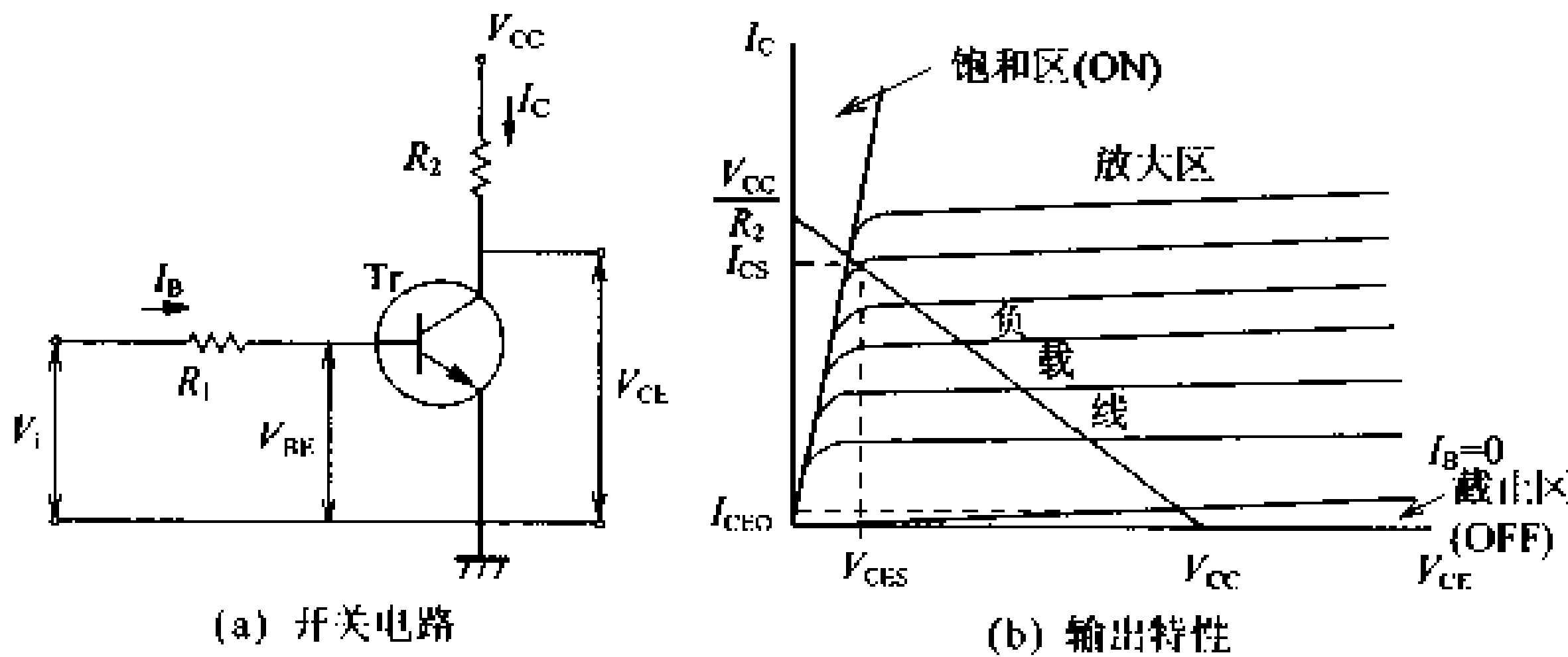


图 4.6 晶体三极管开关

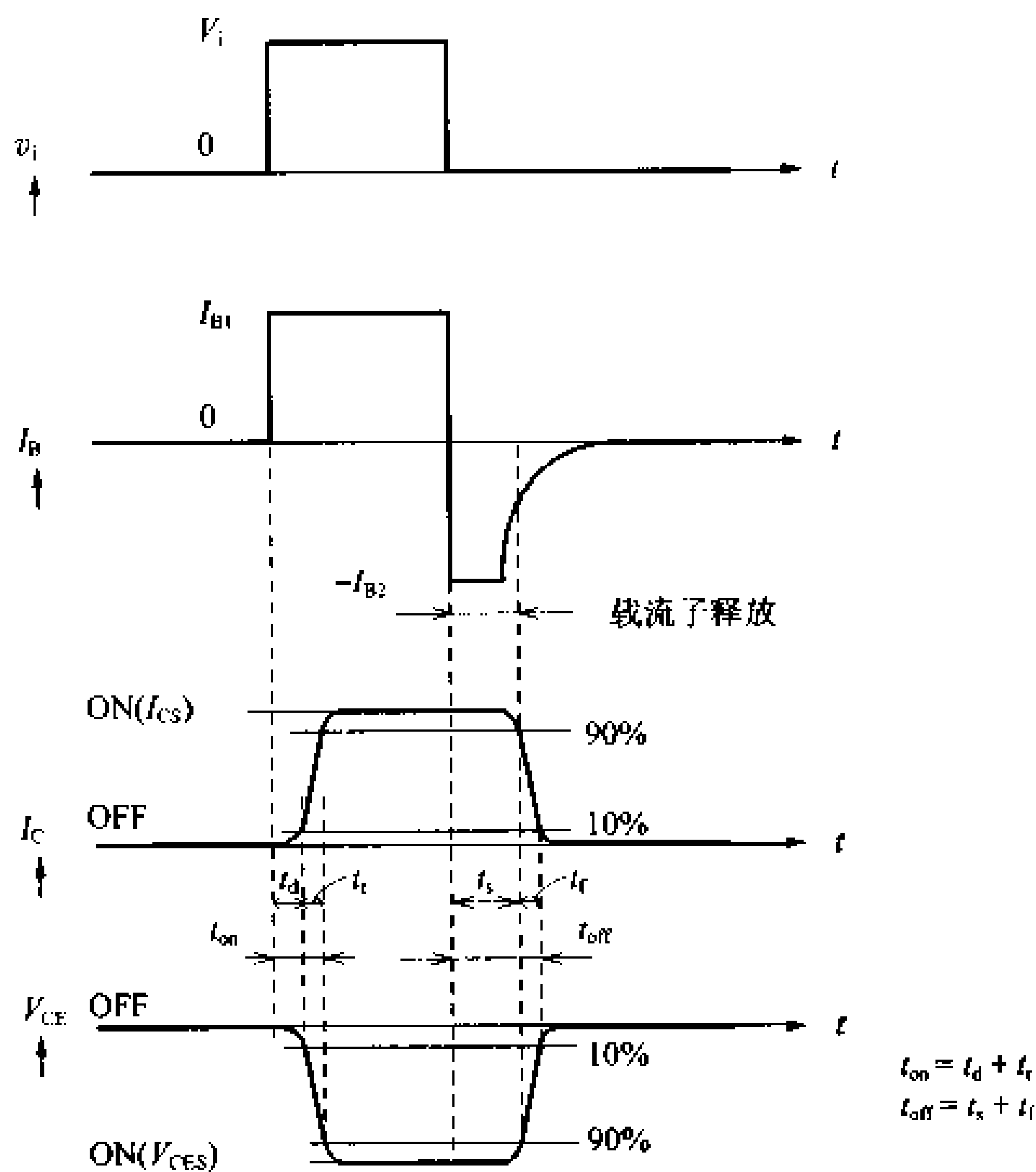


图 4.7 晶体三极管的脉冲响应

输入电压为  $0V$  时,基极没有电流流过,集电极也没有电流流过,集电极与发射极间呈断开状态(OFF)。这时,集电极输出电压近似为  $V_{CC}$ 。这与断开开关的状态相同,也叫做输出高电平(H)。这时,即使去掉输入电压,由于留在基极的载流子的积累作用,也会有反向电流从基极流出。直至此基极电流消失,晶体管一直处于导通状态(ON),只有当载流子释放结束后,晶体管才渐渐转入断开状态。从输入电压变为零直至晶体管截止的延迟时间称为关闭时间  $t_{off}$ 。

关闭时间

### 3 多谐振荡器

#### □ 要 点

多谐振荡器是使用两个反向放大器施以正反馈构成的自激振荡器。它是方波发生器、延时电路、计数器以及存储器等的基本组成电路。多谐振荡器按照电路的构成方式不同,可以分为无稳态、单稳态和双稳态三种。

#### □ 解 释 ● 无稳态多谐振荡器

无稳态多谐振荡器(astable multivibrator)亦称自激多谐振荡器,图 4.8 示出了其基本电路及各部波形。

电路中,施加电源电压  $V_{CC}$  后,晶体管  $Tr_1$  和  $Tr_2$  反复轮流导通(ON)和截止(OFF),产生持续振荡。导通或截止状态取决于直流的平衡。对于无外部触发状态保持不变的称为稳态,而对于经过一定时间,状态自动从导通变为截止或由截止回到导通的,则称为暂稳态。

二个放大电路通过电容  $C_1$ 、 $C_2$  和电阻  $R_{11}$ 、 $R_{12}$  实现交流耦合,电路无稳态。两个暂稳态,按照电路时间常数所确定的周期,交互变化( $Tr_1$ 、 $Tr_2$  反复轮流 ON 和 OFF)产生持续振荡。振荡的周期  $T[s]$  为

$$T=0.69(R_{11}C_1+R_{12}C_2) \quad (4.1)$$

#### ● 单稳态多谐振荡器

单稳态多谐振荡器(monostable multivibrator)亦称单触发多谐振荡器。图 4.9 示出了其基本电路及各部的波形。

两个放大电路,一个是通过  $C_2R_3$  交流耦合到对方,另一个则仅通过  $R_1$  直流耦合到对方。 $Tr_1$  管的基极加有负压  $-V_{BB}$  而截止, $Tr_2$  管则呈导通状态。从外部施加一负向触发脉冲时, $Tr_2$  管的基极变负而截止, $Tr_1$  管则因其基极电压上升而导通。经过一定的时间(由电路的时间常数  $\tau=C_2R_3$  决定)后,电路自动返回到原来的稳定状态( $Tr_1$  截止, $Tr_2$  导通)。

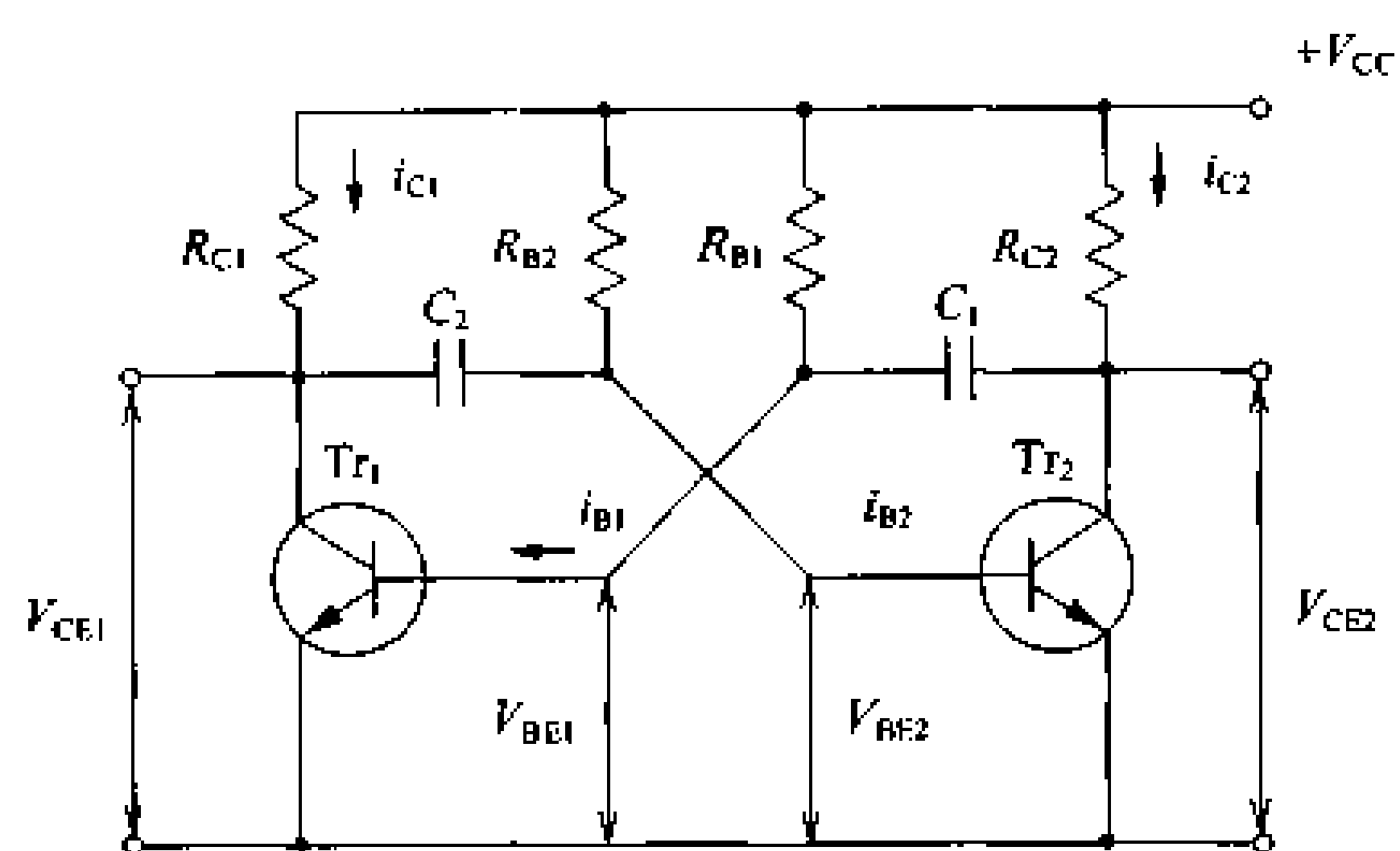
#### ● 双稳态多谐振荡器

双稳态多谐振荡器(bistable multivibrator)可以是集电极基极交互直流耦合的触发电路(flip-flop)型,也可以是发射极耦合的施密特触发电路型。这里,以集电极基极耦合型为例作一说明。图 4.10 示出了其基本电路与波形。

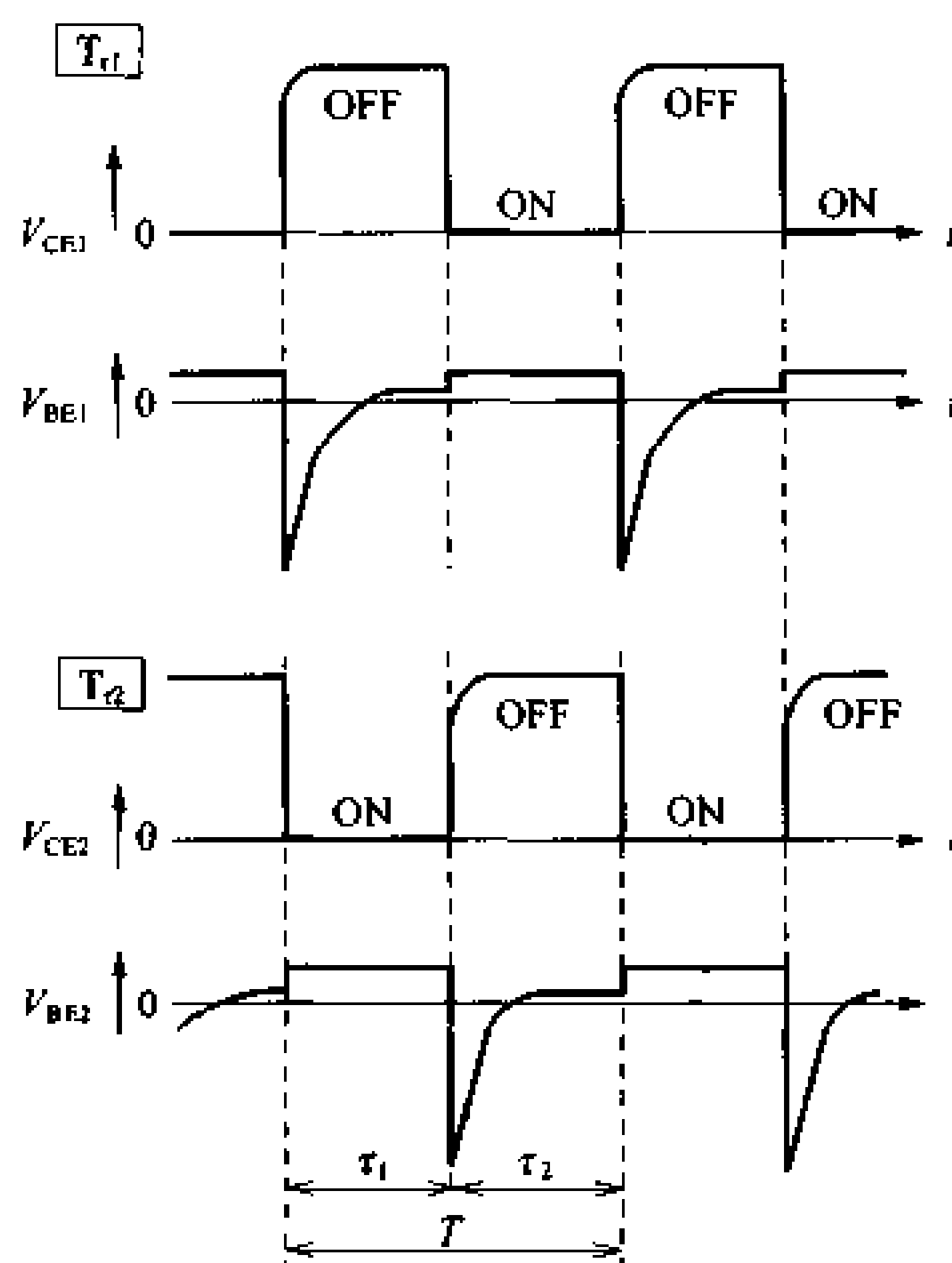
每给一个触发脉冲, $Tr_1$  管和  $Tr_2$  管的导通、截止状态交互变化一次。不给触发脉冲时, $Tr_1$  管和  $Tr_2$  管的导通、截止状态不变。

稳态  
暂稳态

触发电路  
施密特触发电路

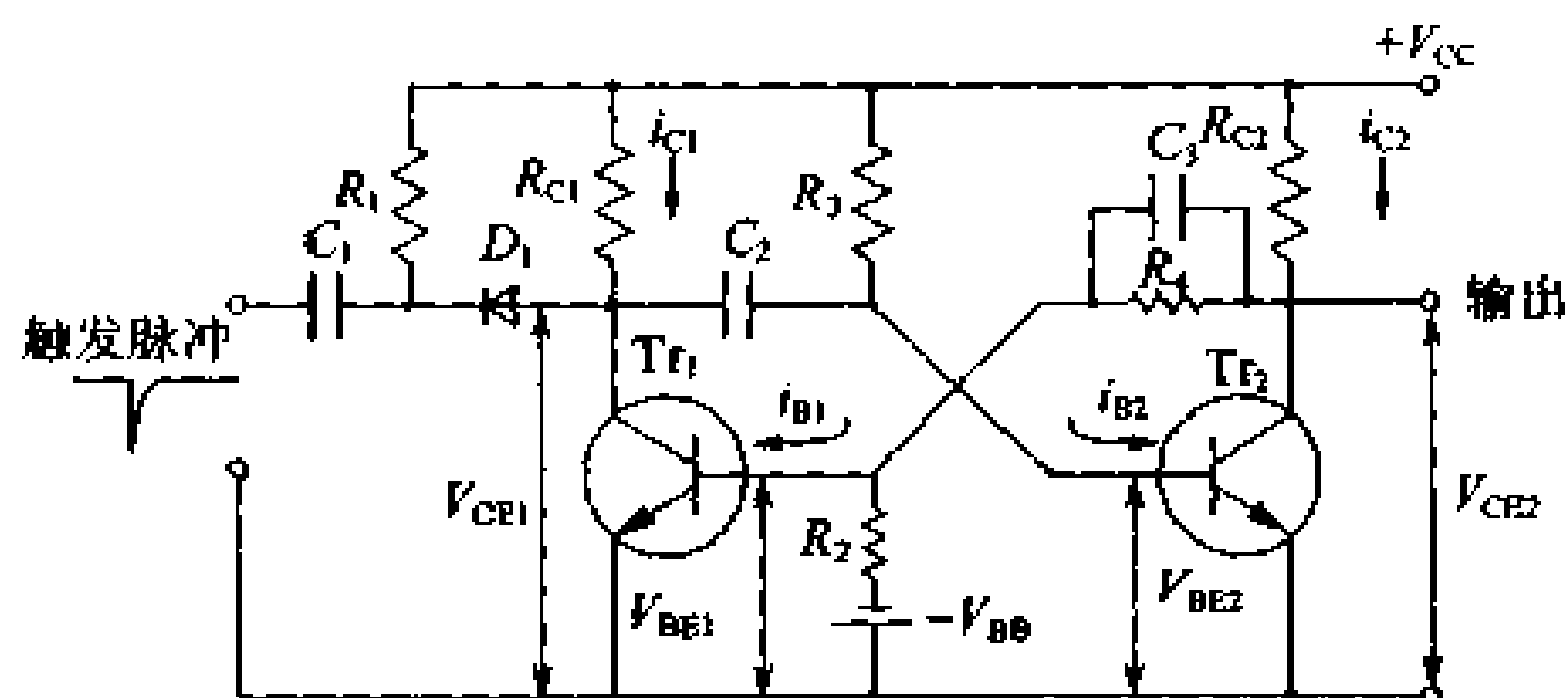


(a) 无稳态多谐振荡器原理电路

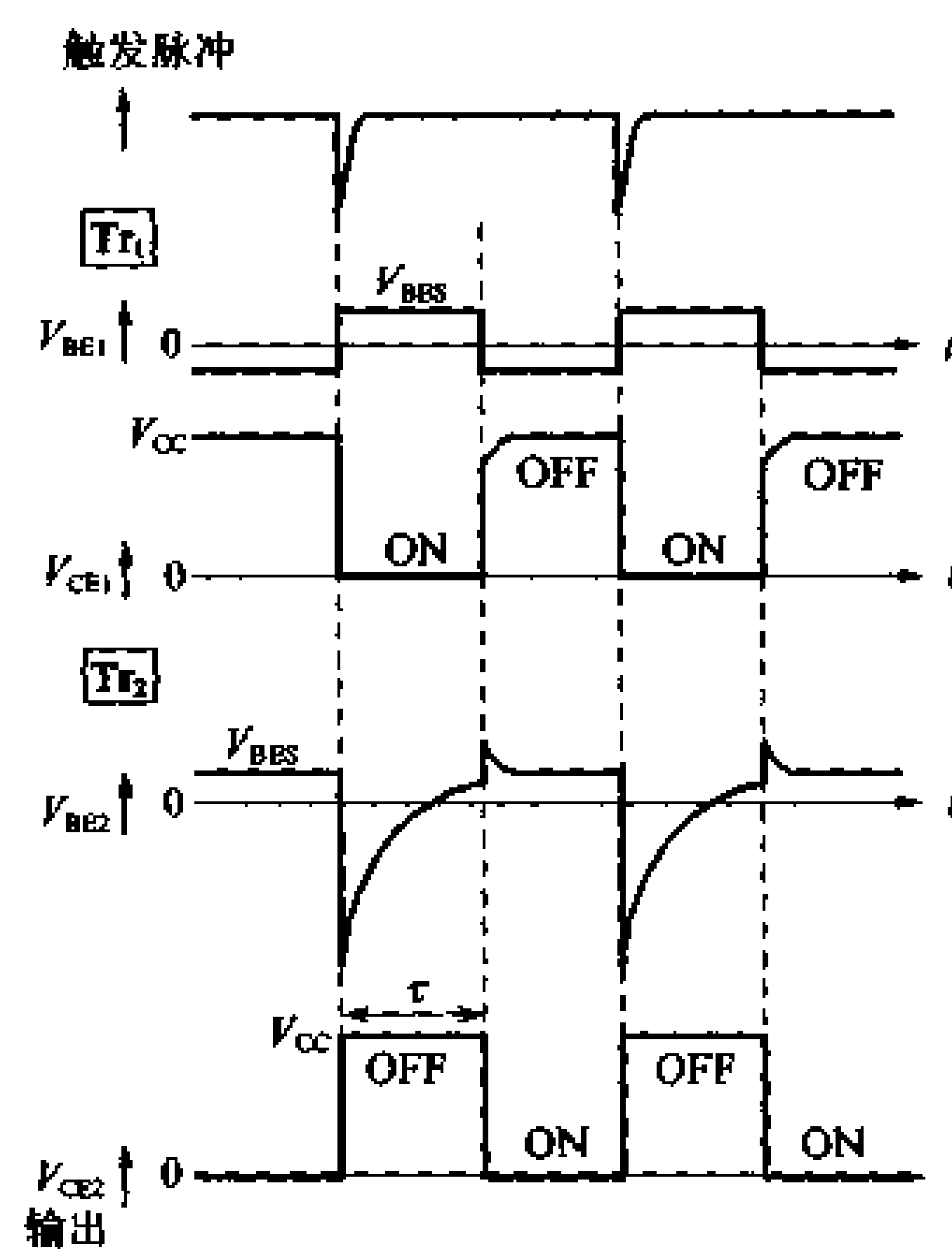


(b) 无稳态多谐振荡器的波形

图 4.8 无稳态多谐振荡器

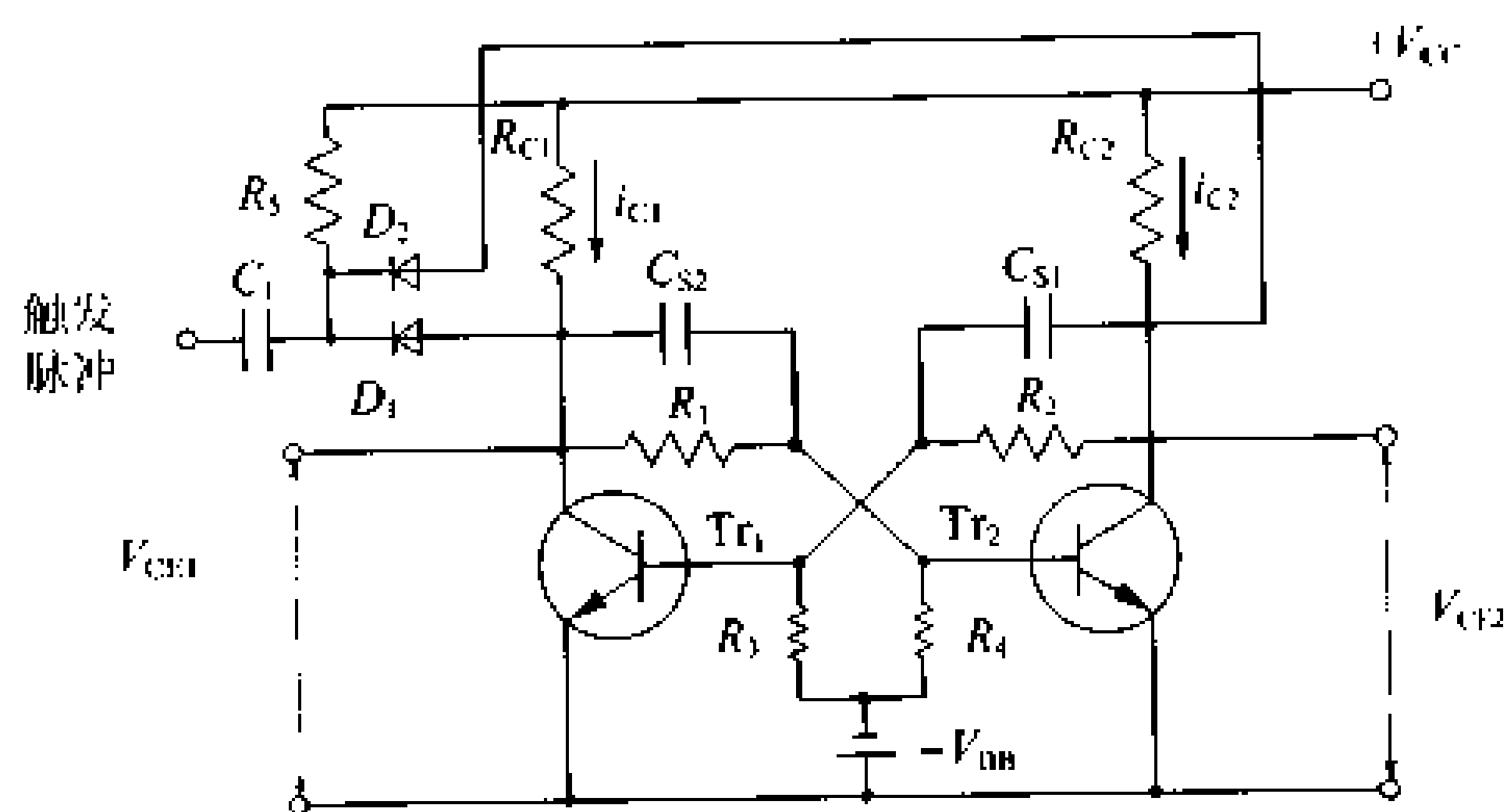


(a) 单稳态多谐振荡器电路(集电极-基极耦合型)

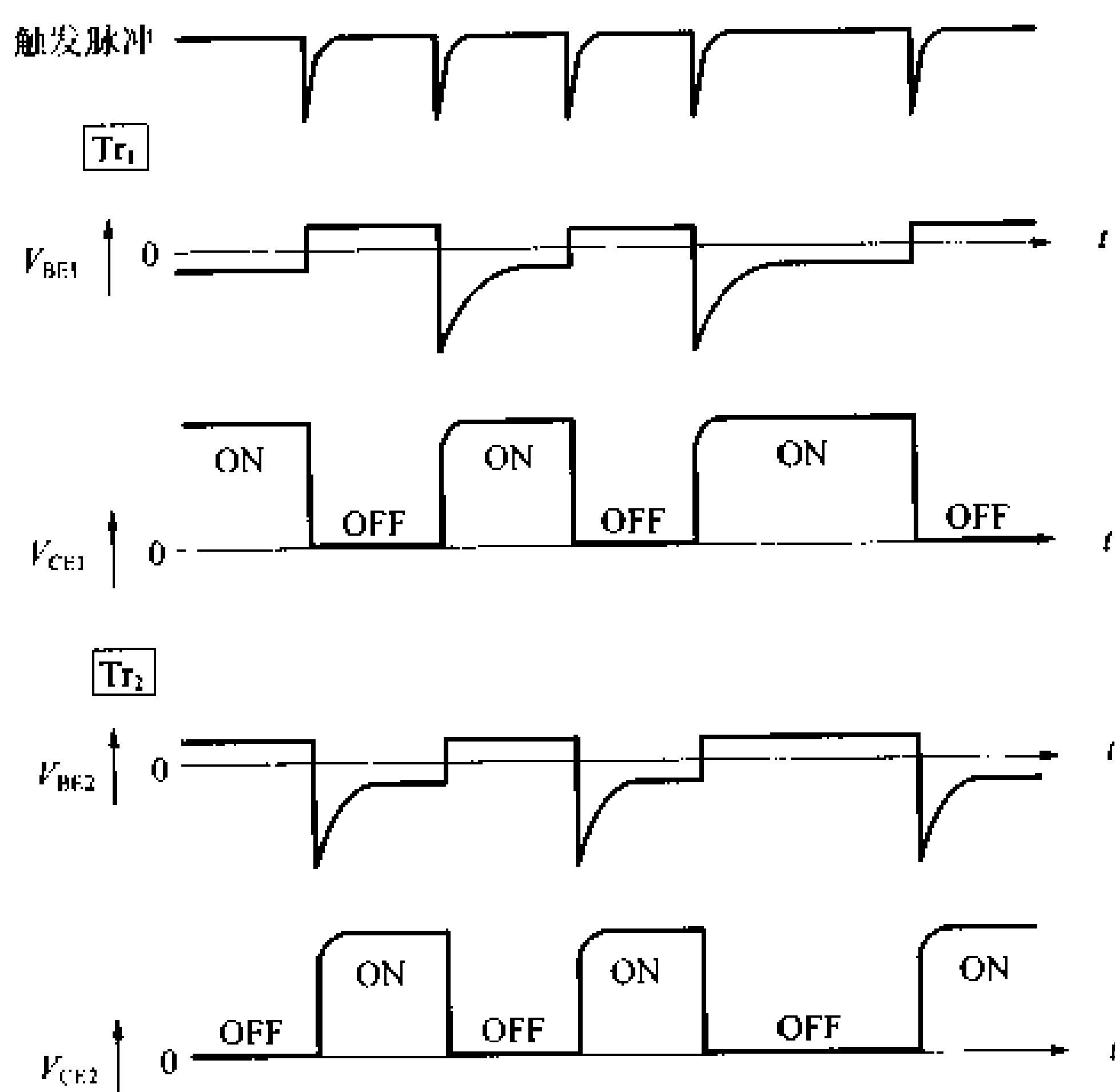


(b) 单稳态多谐振荡器的波形

图 4.9 单稳态多谐振荡器



(a) 双稳态多谐振荡器



(b) 双稳态多谐振荡器的波形

图 4.10 双稳态多谐振荡器

# 4 施密特触发电路

□ 要 点

施密特触发电路(schmidt trigger circuit)是双稳态多谐振荡器的一种。其中一只管子的集电极直流耦合到另一只管子的基极,这另一只管子则与对方发射极耦合。

施密特触发电路主要用来将正弦波等非脉冲信号变换为适于数字电路工作的脉冲,以及将波形畸变了的脉冲进行整形。

□ 解 释 ● 将正弦波变为方波

施密特触发电路的基本电路与其波形显示在图 4.11 中。

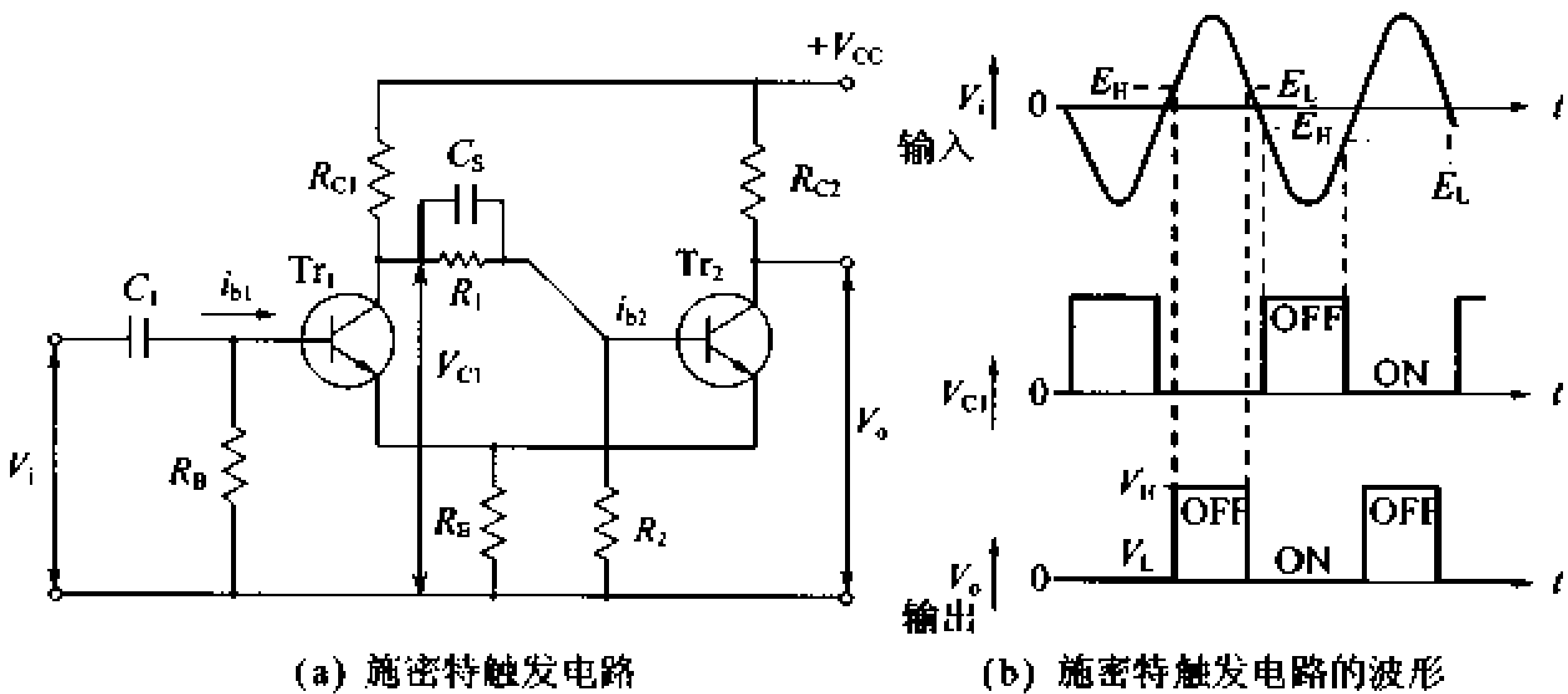


图 4.11 施密特触发电路

阈值  
门限电平

这种电路,当输入信号达到某规定电压值( $E_H$ 、 $E_L$ )时,其输出电位会立即跳变( $V_H$ 、 $V_L$ )。因而常用于作振幅比较器,以及将正弦波变换为方波等。从电路输入端输入正弦波,并当输入电压  $V_i$  超过  $E_H$  时,电流  $I_{b1}$  产生,  $Tr_1$  管导通,  $Tr_2$  管截止,输出电压  $V_o$  为高电平  $V_H$ 。当输入电压  $V_i$  降至  $E_L$  以下时,电流  $I_{b1}$  消失,  $Tr_1$  管截止、 $Tr_2$  管导通,输出电压  $V_o$  为低电平  $V_L$ 。此过程重复进行,正弦波即被变换为方波。 $E_H$  和  $E_L$  是决定管子导通或截止的电压值,因而称为阈值或门限电平。

■ 应用知识 录像机伺服电路中的应用

录像机中有一驱动录像头转筒的电机。将其转速变化造成的频率改变转换成直流电压取出,据此可对其转速进行校正。这样的校正电路称为录像头转筒转速伺服控制



电路。在此伺服电路中,施密特触发电路的作用就是作为频率-电压(F-V)变换电路的一部分,将与电机转速成比例的频率信号(FG 输出)变换为方波。

图 4.12 示出了伺服电路的部分框图、F-V 变换电路框图以及波形的输出。

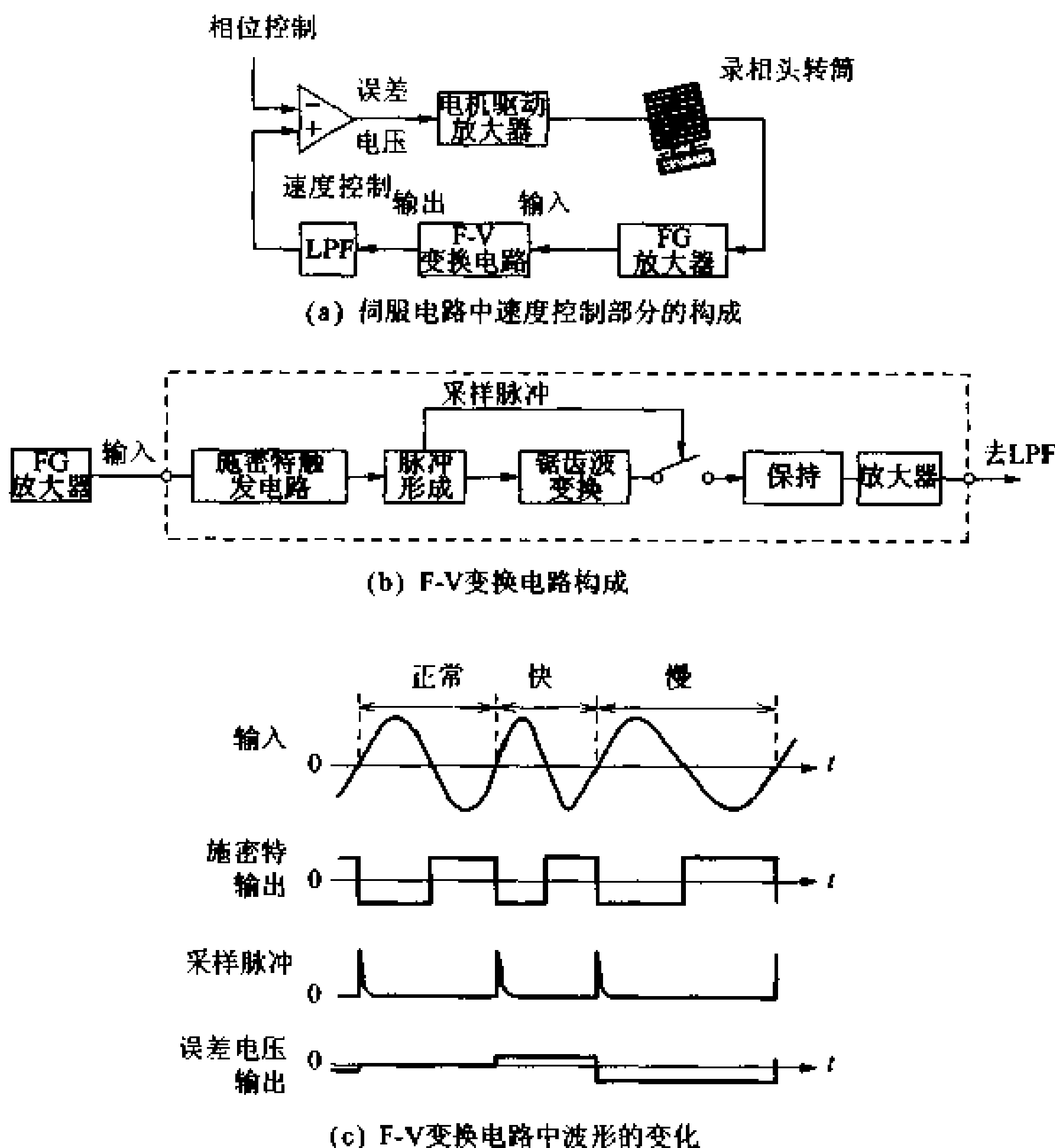


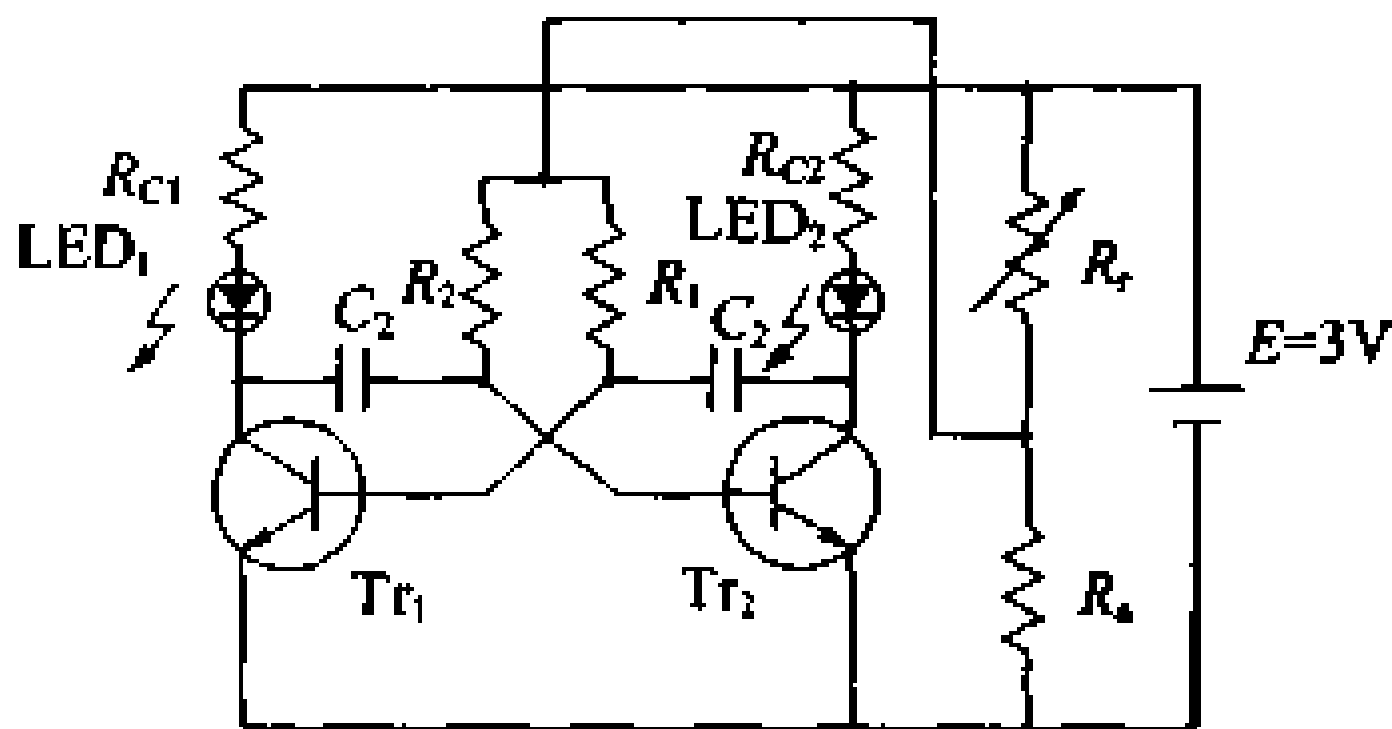
图 4.12 施密特触发电路在伺服电路中的应用

### 应用基础 利用无稳态多谐振荡器制作闪光信号灯

利用无稳态多谐振荡器的两部分的交互振动特性,可以制作左右亮、灭的闪光信号灯。其电路图和所需元件显示在图 4.13 中。电路的工作原理与无稳态多谐振荡器相同,  $Tr_1$  管和  $Tr_2$  管按一定的周期重复导通和截止而产生脉冲。 $Tr_1$  管和  $Tr_2$  管的集电极处安装有发光二极管,它们将交互产生的脉冲电流变成光,变成一亮一灭的闪光信号。闪光的周期  $T[s]$  可按下式求得:

$$T = 0.69(C_1 R_1 + C_2 R_2)$$

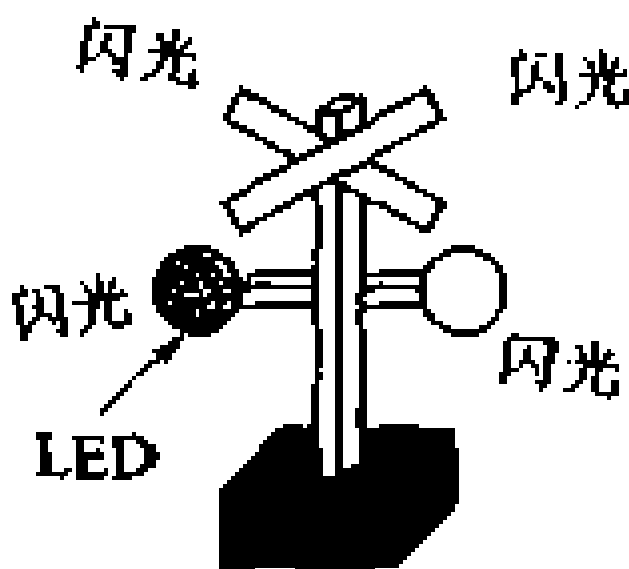
电路中,电阻  $R_1$  和  $R_2$  通过  $R_c$  和  $R_s$  与电源相连, $R_c$  为可变电阻器时,可通过其变化改变闪光周期。这种信号灯可用作铁路模型的附件等。



(a) 闪光信号灯电路图例

符 号	名 称	规 格	数 量
$Tr_1, Tr_2$	晶体管	2SC 1815	2
$LED_1, LED_2$	发光二极管	红色	2
$R_1, R_2$	电阻器	$10k\Omega$ 1/8W	2
$R_{c1}, R_{c2}$	电阻器	$150\Omega$ 1/8W	2
$R_s$	电阻器	$430\Omega$ 1/8W	1
$R_c$	可变电阻器	$1k\Omega$	1
$C_1, C_2$	电解电容	$22\mu F$ 6.3V	2
$E$	干电池	1.5V 单3或4	2
印刷电路板			1

其他: 盒子、轻质木材(信号灯的支架)、涂料(黑、黄)光传感器、可变电阻器用旋钮等



(b) 元件表

图 4.13 闪光信号灯电路及其元件

## 5 微分电路与积分电路

### □ 要 点

根据信号电压对时间的微分或积分,对信号波形进行变换整理的电路,称为微分电路或积分电路。这种电路是电容 $C$ 和电阻 $R$ 的组合电路。无论微分电路或是积分电路,都要使用电容,利用电容的充放电特性进行微分或积分。

### □ 解 释 ● 微分电路

微分电路(differentiating circuit)指的是将电压变成对时间的微分值后进行输出的电路。其基本电路及输入输出的变化显示在图 4.14 中。

将图 4.14(b)所示电压 $V_i$ 作为输入电压加于图 4.14(a)的电路上,电容急剧充电。输入电压变为零时,电容器中所充的电荷开始放电,放电电流的方向与图 4.14(a)所标的方向相反,电阻 $R$ 的两端出现负电压。图 4.14(a)电路的时间常数 $T_c$ [s]按下式计算

$$T_c = CR \text{ [s]} \quad (4.2)$$

时间常数 $T_c$ 与脉冲宽度 $\tau$ [s]之间,当 $T_c \gg \tau$ 时,电路输出波形呈现缓慢的曲线变化,而当 $T_c \ll \tau$ 时,输出呈现急剧变化。

电阻 $R$ 上的电压 $V_o$ [V]为

$$V_o = V_i e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.3)$$

而当 $T_c \ll \tau$ 时,如图 4.14(d)所示,输出电压 $V_o$ 则为

$$V_o = R_i \approx RC \frac{dV_i}{dt} \quad (4.4)$$

输出电压 $V_o$ 近似为输入电压 $V_i$ 对时间的微分与 $RC$ 的乘积(不可能完全微分)。微分电路主要用于提取波形的上升沿和下降沿。

### ● 积分电路

积分电路(integrating circuit)指的是将输入电压变成对时间的积分值后进行输出的电路。其基本电路及输入输出的变化显示在图 4.15 中。由于电阻 $R$ 在电路的输入端,因而当加上输入电压 $V_i$ 时,其输出的上升沿并不像微分电路那样急剧变化,而是电位渐渐上升,给电容充电。输入电压变为 0 时,电容器开始放电,输出电压 $V_o$ 开始缓慢下降。这一充放电过程会重复进行。

时间常数 $T_c$ 和脉冲宽度 $\tau$ 之间,如图 4.15(b)、(c)、(d)所示,当 $T_c \ll \tau$ 时,输出波形呈方波变化,而当 $T_c \gg \tau$ 时,输出则呈三角波变化。输出电压 $V_o$ [V]为

时间常数

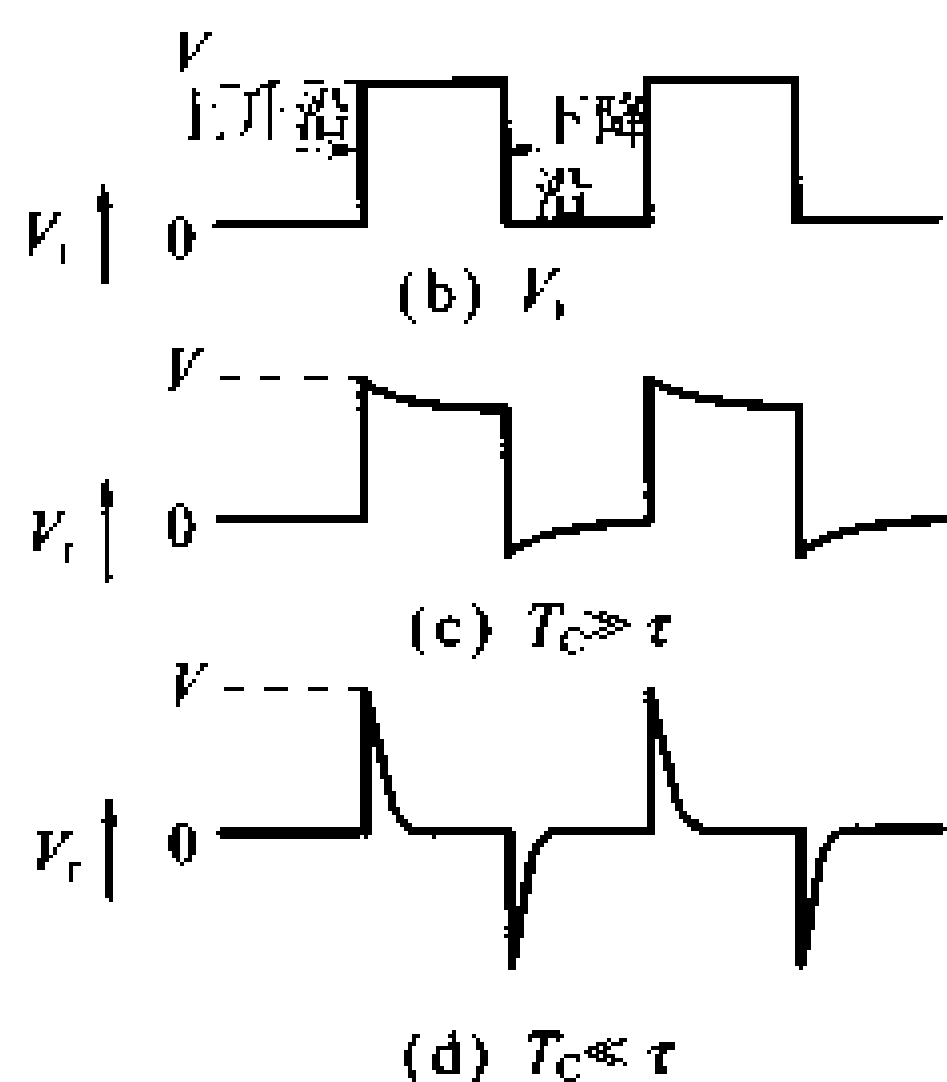
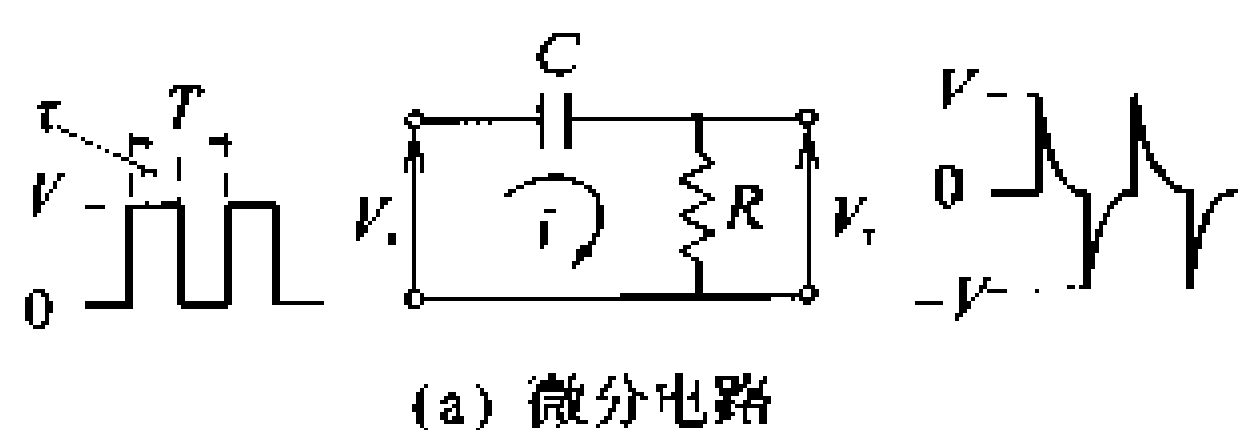


图 4.14 微分电路及其输入输出波形

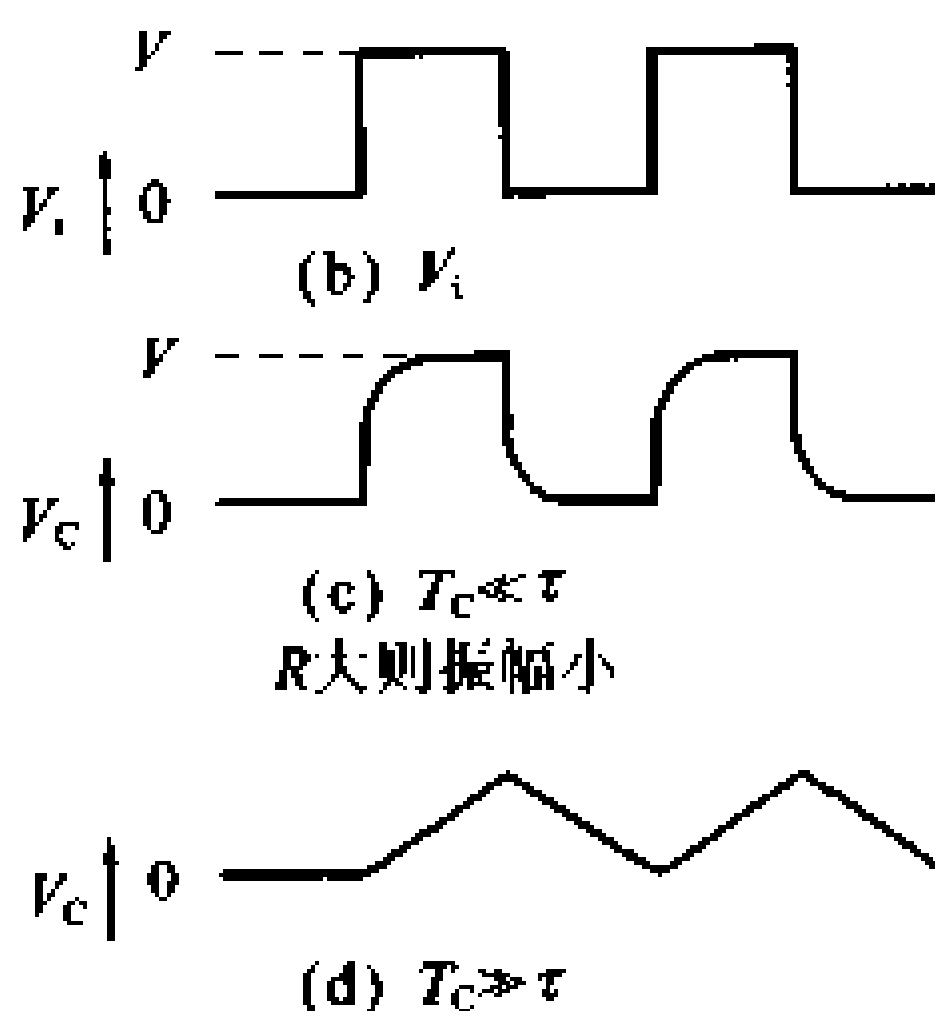
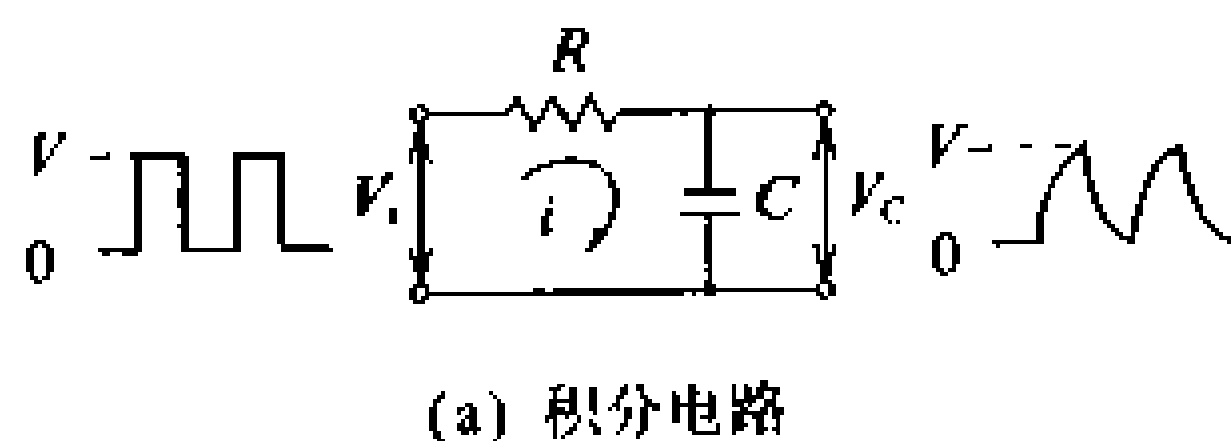


图 4.15 积分电路及其输入输出波形

$$V_c = V_i (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4.5)$$

输出为图 4.15(d) 的三角波时, 输出电压  $V_c$  可写成

$$V_c \approx \frac{1}{RC} \int_0^t V_i dt \quad (4.6)$$

输出电压  $V_c$  近似等于输入电压  $V_i$  对时间的积分与  $1/RC$  的乘积 (不可能完全积分)。

### 例 题

图 4.14(a) 的微分电路中,  $T_c \ll \tau$  的情况下, 如图 4.14(d) 所示, 输入电压  $V_i$  下降时输出电压变成负脉冲, 试述其变化的理由。

**答** 假设产生输入电压的电源内阻为 0, 无脉冲期间就相当于输入端短路, 电容器上所充的电荷开始放电。  $T_c \ll \tau$  时, 放电很急剧,  $V_i$  下降前  $V_c$  已经为 0,  $V_i$  下降时, 输出端则会产生负脉冲。

## 6 各种各样的整形电路

### □ 要 点

脉冲信号通过各种电路时,会因为波形畸变失真而引起误动作。因而需要采用整形电路对信号波形进行整形或者重新进行变化。整形电路亦称波形变化操作电路。这里,就截取、双向限幅、削波、钳位等电路进行说明。

### □ 解 释 ● 截取电路(提取波形的顶部)

信号相对于某基准电平的上部或下部需要提取或削去时,使用的电路就是**截取电路**(clipper)。

#### 截底

图 4.16(a)的**截底**,提取的是波形的顶部。输入信号  $v_i$  低于电池电压 5V 时,二极管导通,输出电压保持在 5V。 $v_i$  超过 5V 的部分,由于二极管截止,信号的顶部可以被取出。

#### 截顶

图 4.16(b)的**截顶**,提取的则是包含信号中心部分在内的某电平以下的信号波形。

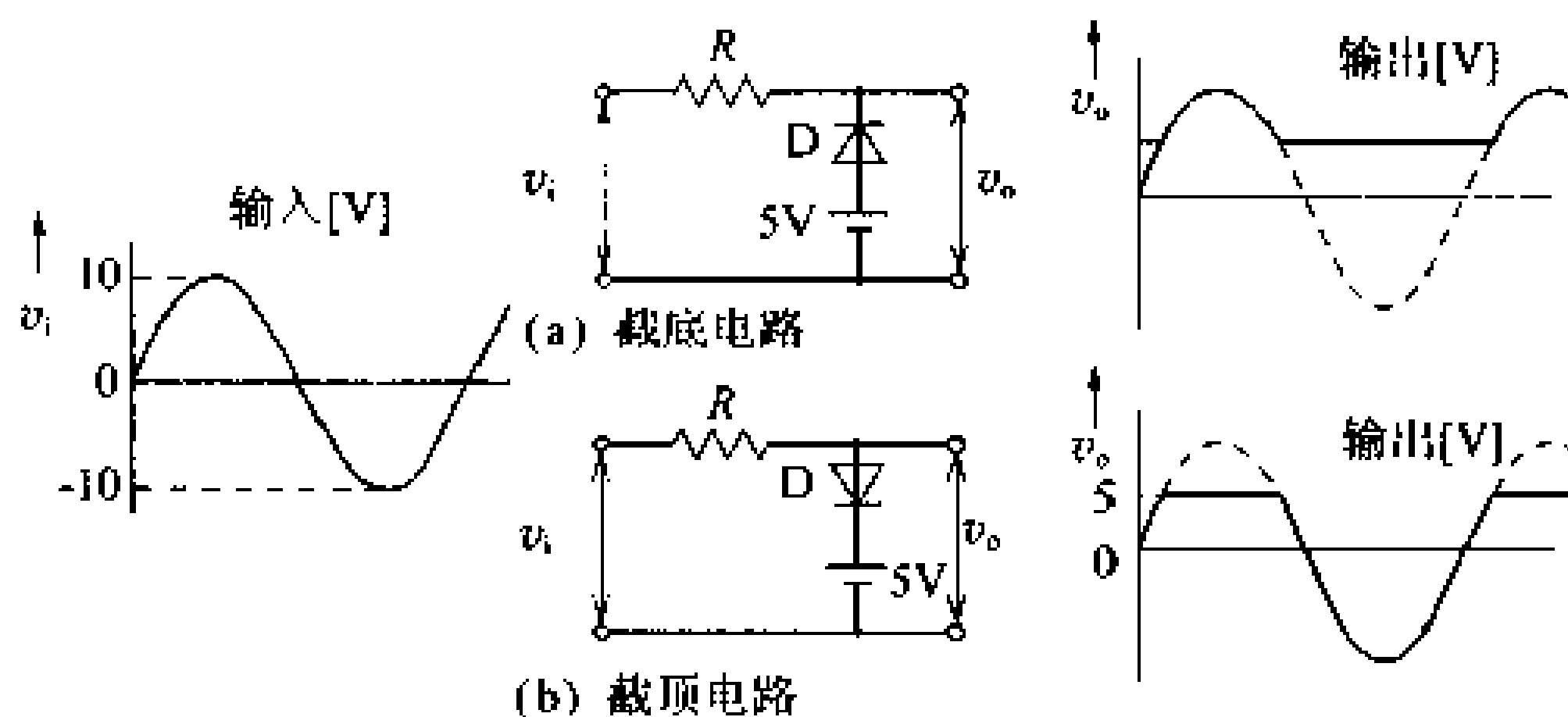


图 4.16 截取电路

### ● 双向限幅电路(提取波形的中心部分)

图 4.17 所示的限幅电路,削去了输入信号的上部和下部,而将剩余的部分提取出来。输出电压的正负极限值的大小,取决于加在二极管上的直流电压值。图中, $D_2$  下的电池将信号的最大值限制在 5V,而  $D_1$  下的电池则将信号的最小值限制在 -5V。

### ● 削波电路(切取波形中间的一部分)

削波电路是限幅电路的一种应用,用来提取输入信号中的一部分。图 4.18 示出了削波电路及其输入输出波形。图中切取的是信号中 5~8V 间的部分。

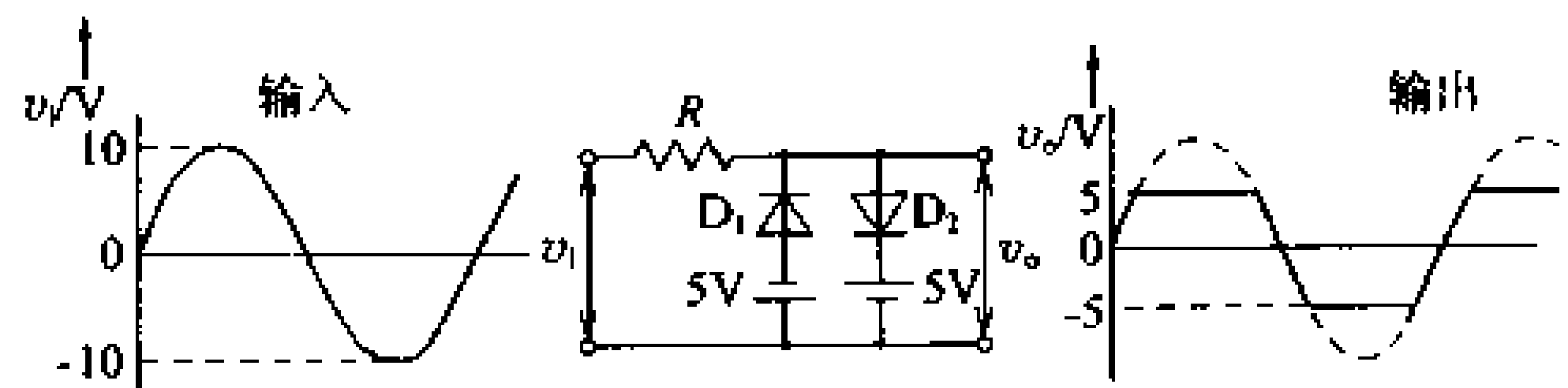


图 4.17 双向限幅电路

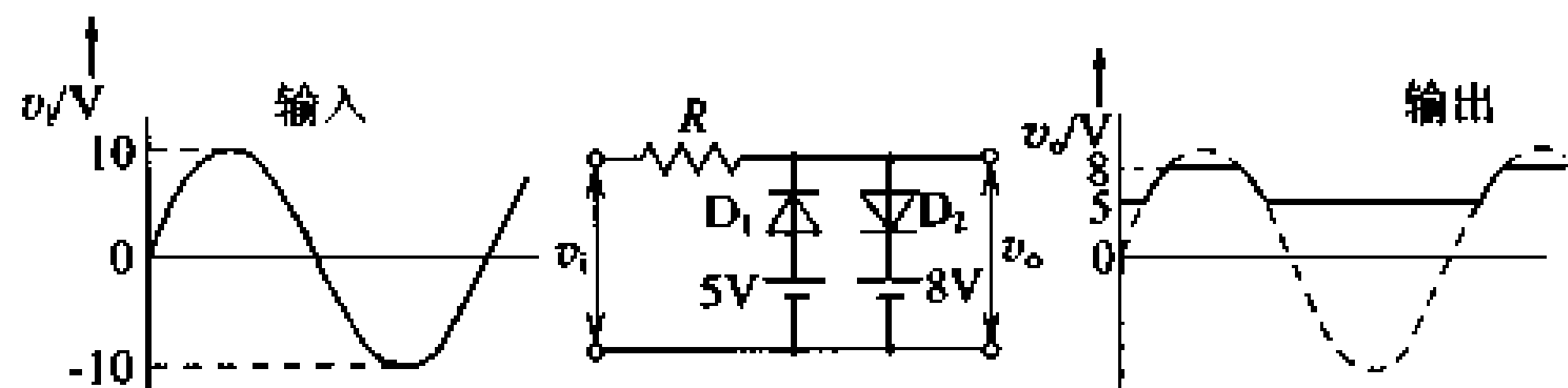


图 4.18 削波电路

钳位电路  
正钳位电路  
负钳位电路

● 钳位电路(加一直流电平在信号波形上)

将一直流电压加于某信号电压上,仅使信号整体抬高或下降的电路,称为钳位电路。如图 4.19(a)所示,提高直流电平的电路,称为正钳位电路,而如图 4.19(b)所示,降低直流电平的电路,则称为负钳位电路。

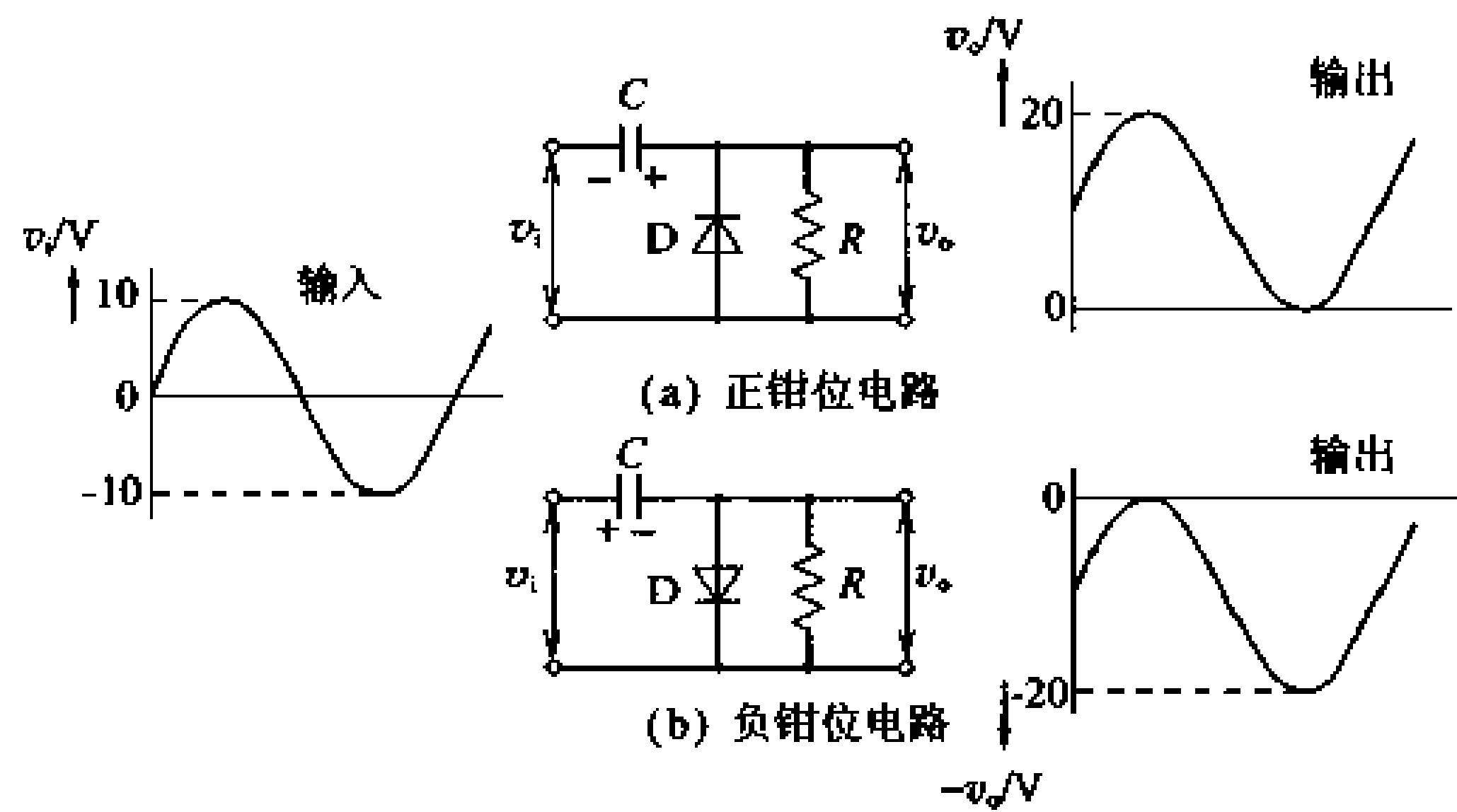


图 4.19 钳位电路

## 7 锯齿波的产生

### □ 要 点

锯齿波是脉冲波的一种,因其波形像锯条的齿而得名。对周期确定的脉冲进行积分,即可产生锯齿波。它常用于电视机、示波器等阴极射线管的扫描等。锯齿波可用密勒积分电路或自举电路来发生。

### □ 解 释 ● 锯齿波发生电路

图 4.20 给出了锯齿波的发生原理及其输出波形。图中的电路是一积分电路。打开开关时,电容  $C$  上的充电电压  $v_c$  渐渐增大,其变化情况取决于电路的时间常数。此时的充电电压  $v_c$  为

$$v_c = V(1 - e^{-\frac{t}{CR}}) \quad (4.7)$$

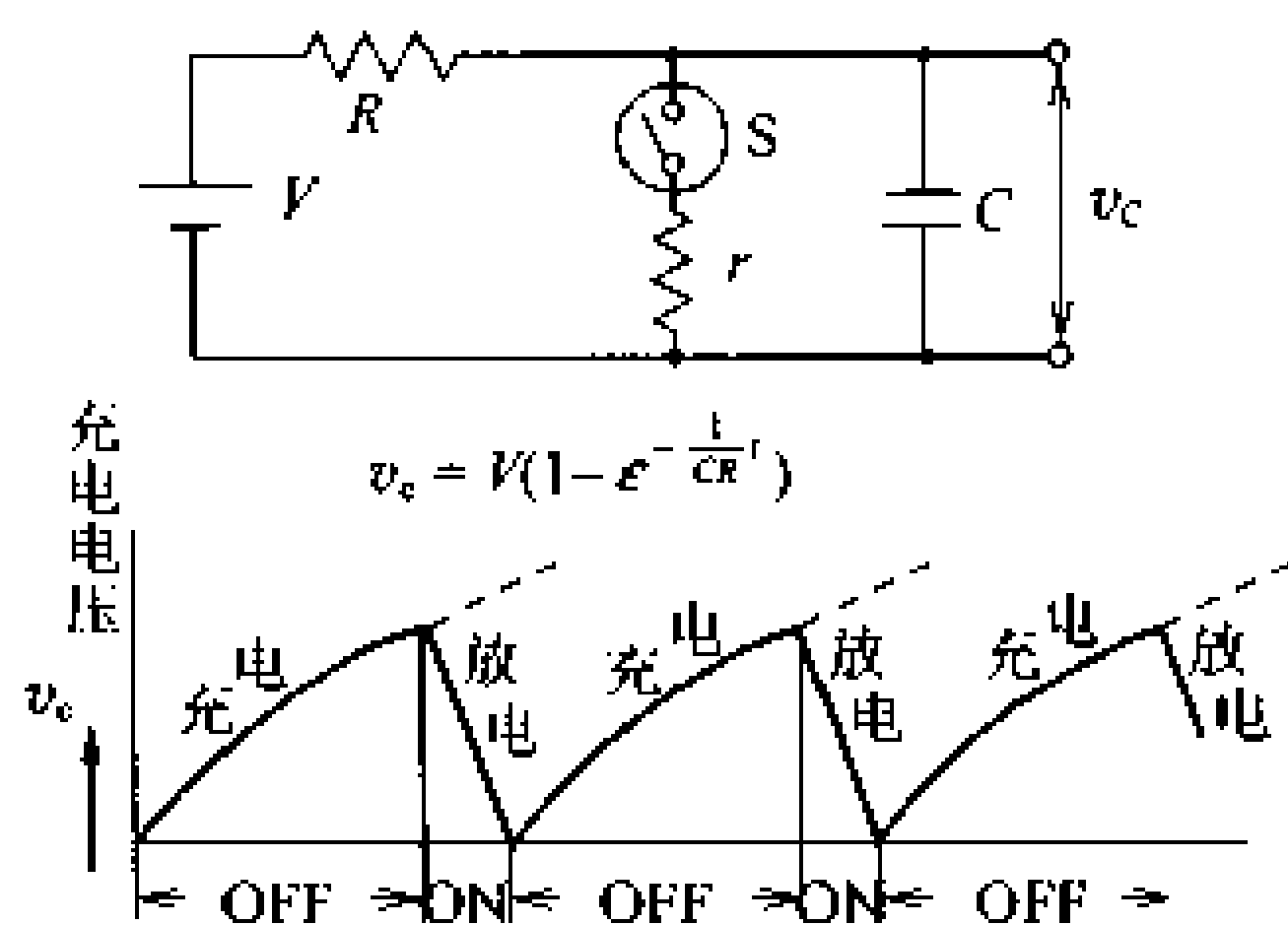


图 4.20 锯齿波的发生原理

合上开关时,电容  $C$  放电。此过程重复进行即可获得锯齿波。将此开关代之以晶体三极管,即得到图 4.21 所示的电路。该电路中,三极管的基极电压为正时,管子导通。据此,当给电路输入周期确定的脉冲波时,即可在输出端发生锯齿波。

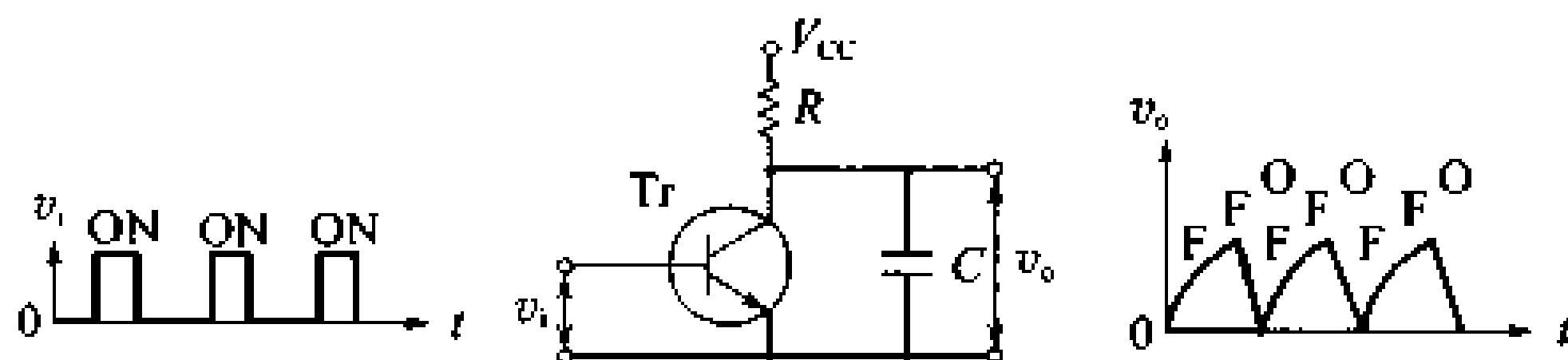


图 4.21 锯齿波发生电路

● 密勒积分电路

晶体管开关电路中,为改善其线性,可以增大CR,但其缺点是输出电压太小。能够克服此缺点的电路是密勒积分电路。

图 4.22 给出了典型的密勒积分电路及其原理说明。输入阻抗很大、输出阻抗比起  $R_1$  或  $1/j\omega C$  很小时,流经  $R_1$  和  $1/j\omega C$  的电流是近似相同的。这里,  $-A$  表示放大倍数为负,即相位错开  $180^\circ$ 。这就是密勒效果。此时  $\dot{V}_3$  为

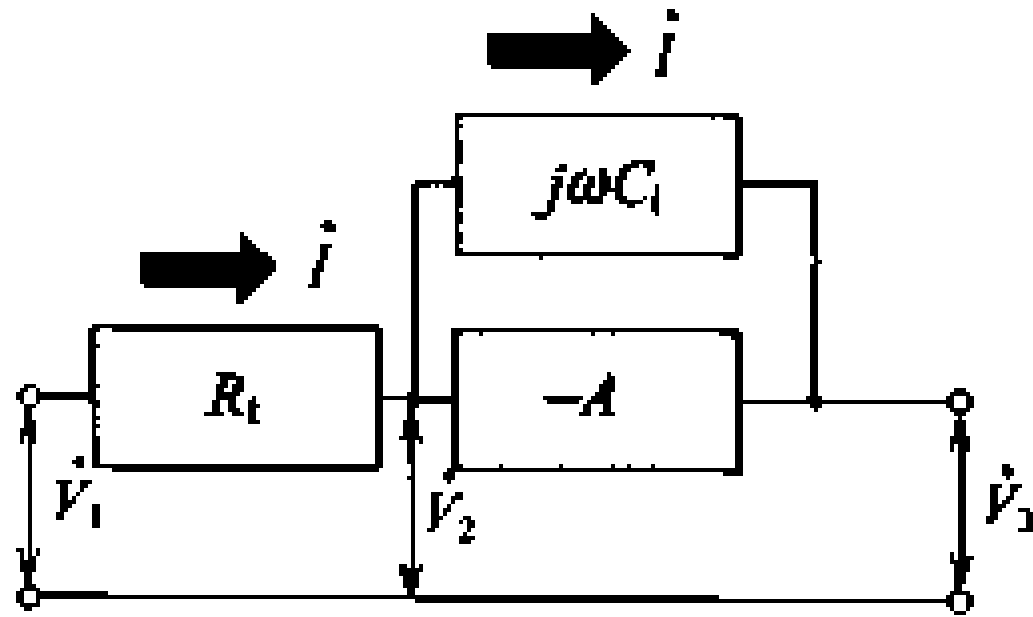
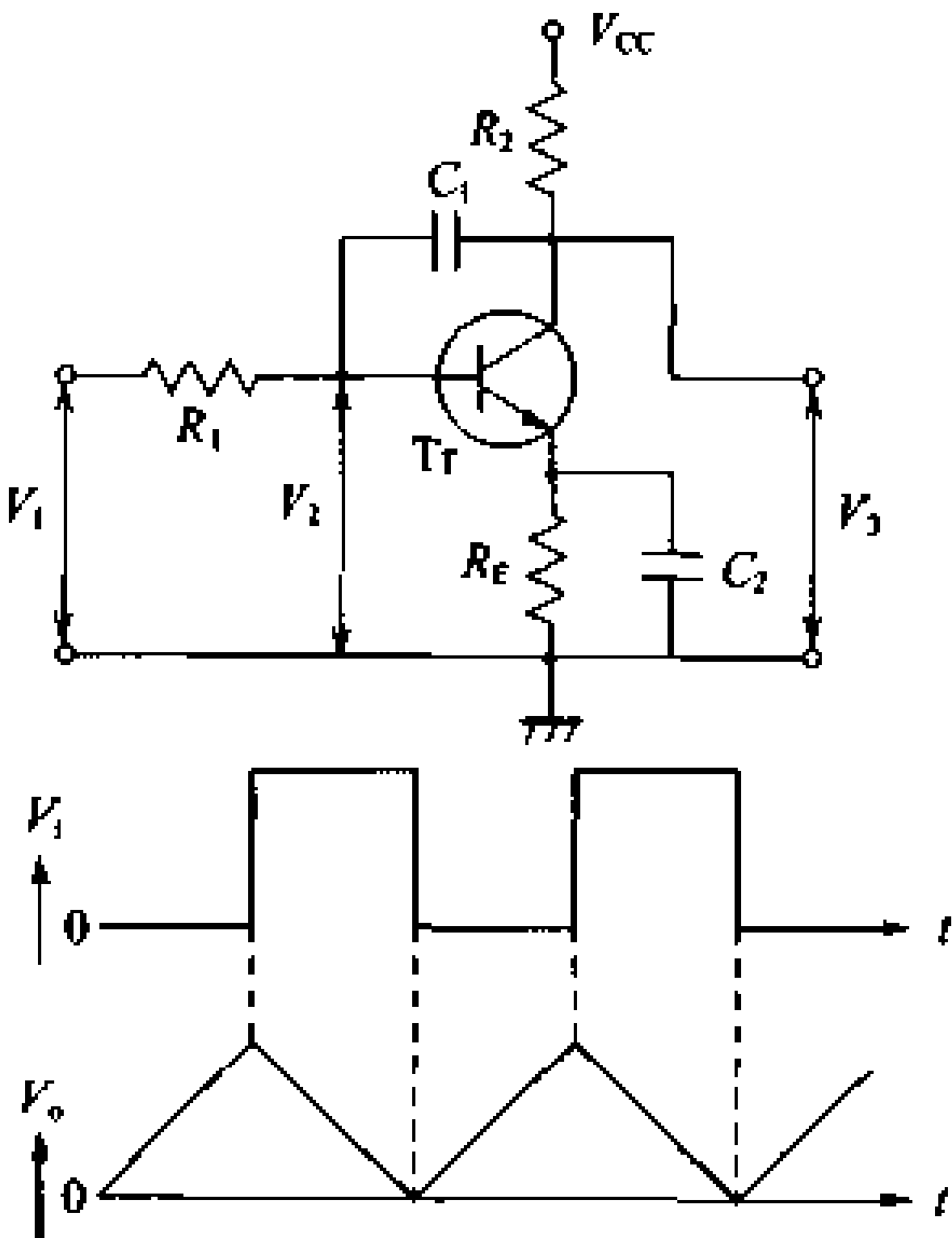


图 4.22 密勒积分电路及其输入输出波形

$$\dot{V}_3 = \frac{A \dot{V}_1}{1 + (1 + A)j\omega C_1 R_1} \dot{V}_1 \tag{4.8}$$

而对一般的积分电路(图 4.23)输入  $\dot{V}_1$  时,其输出电压  $\dot{V}_0$  仅为



$$\dot{V}_o = \frac{\dot{V}_i}{1 + j\omega C_1 R_1} \quad (4.9)$$

比较式(4.8)与式(4.9),可知时间常数、输出电压值均增大了约  $A$  倍,从而可以获得线性好幅值高的锯齿波。

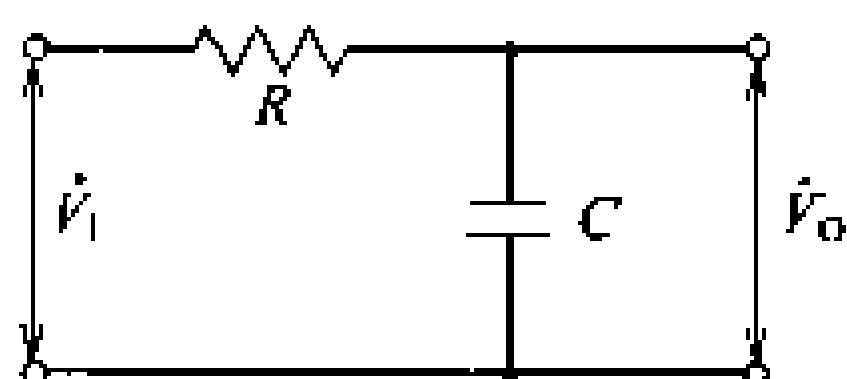


图 4.23 积分电路

### ● 自举电路

图 4.24 给出了典型的自举电路及其原理说明。 $Tr_1$  管作为开关使用, $Tr_2$  管构成射极跟随放大电路。自举电路的时间常数  $T_b$  为

$$T_b = \frac{CR}{1-G} \quad (4.10)$$

射极跟随电路的放大倍数  $G$  近似为 1,因而

$$T_b \approx \infty$$

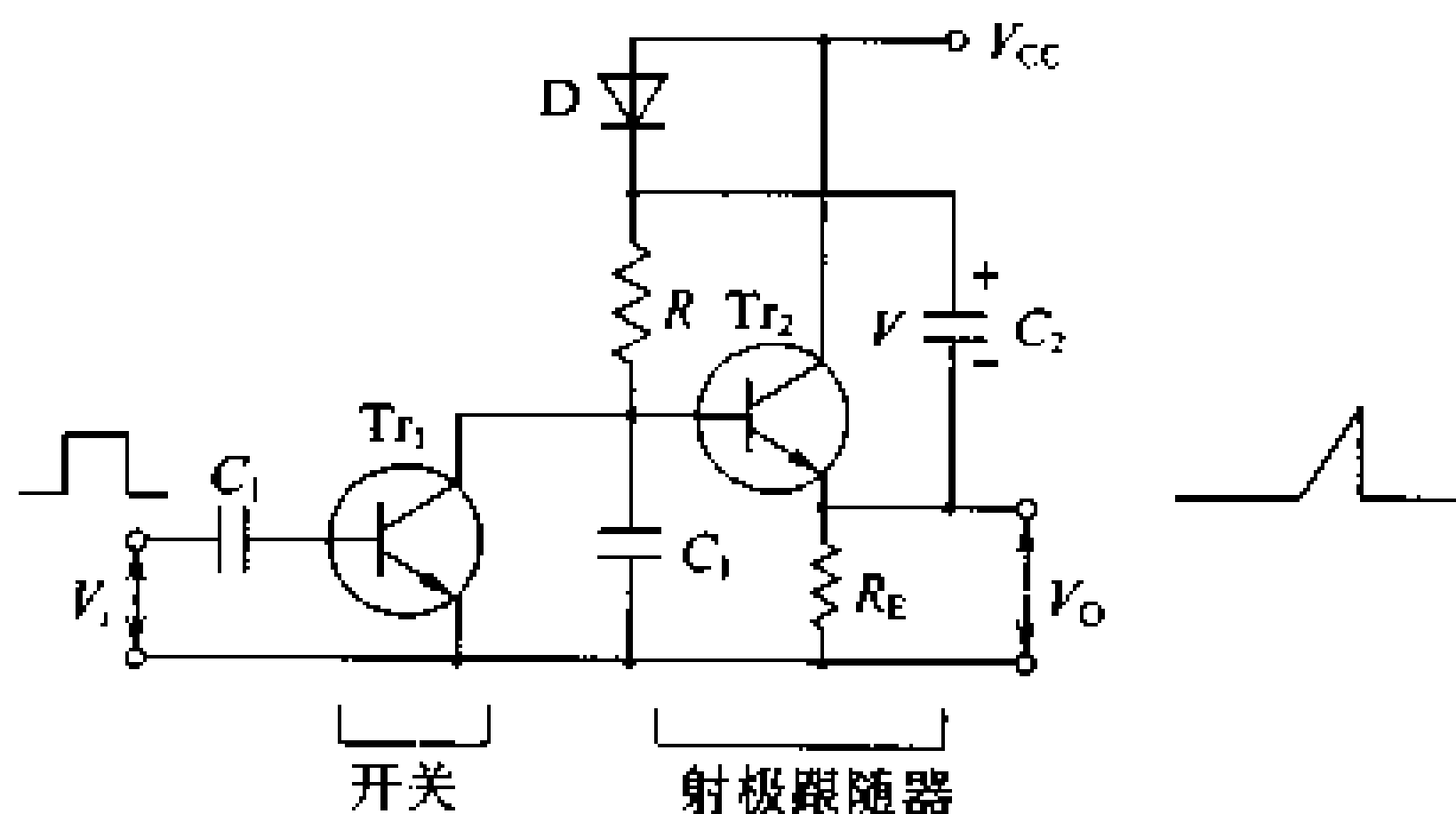


图 4.24 自举电路

# 8 脉冲放大电路

## □ 要 点

脉冲放大电路要处理的是急剧变化的脉冲,因而其构成与晶体管开关电路相同。根据输出特性中工作点在负载线上位置的不同,可以分为饱和型脉冲放大电路和非饱和型脉冲放大电路。饱和型电路中集电极电流在饱和区和截止区间变化,而非饱和型电路中集电极电流则在放大区和截止区间变化。

## □ 解 释 ● 饱和型脉冲放大电路

图 4.25 给出了饱和型脉冲放大电路的基本电路及其输出特性。如图 4.25(b)所示,在输出特性图上画出负载线,即可求得工作点。该电路设计中, $R_B$  选得较小,因而当管子导通时,工作点即进入饱和区。此时,集电极的电压损失也小,可以获得较大的输出电压,电路也简单。其缺点是开关动作较慢。为此,可采用在  $R_B$  两端并入一加速电容  $C_s$ ,迫使基极电流快速流过等措施。

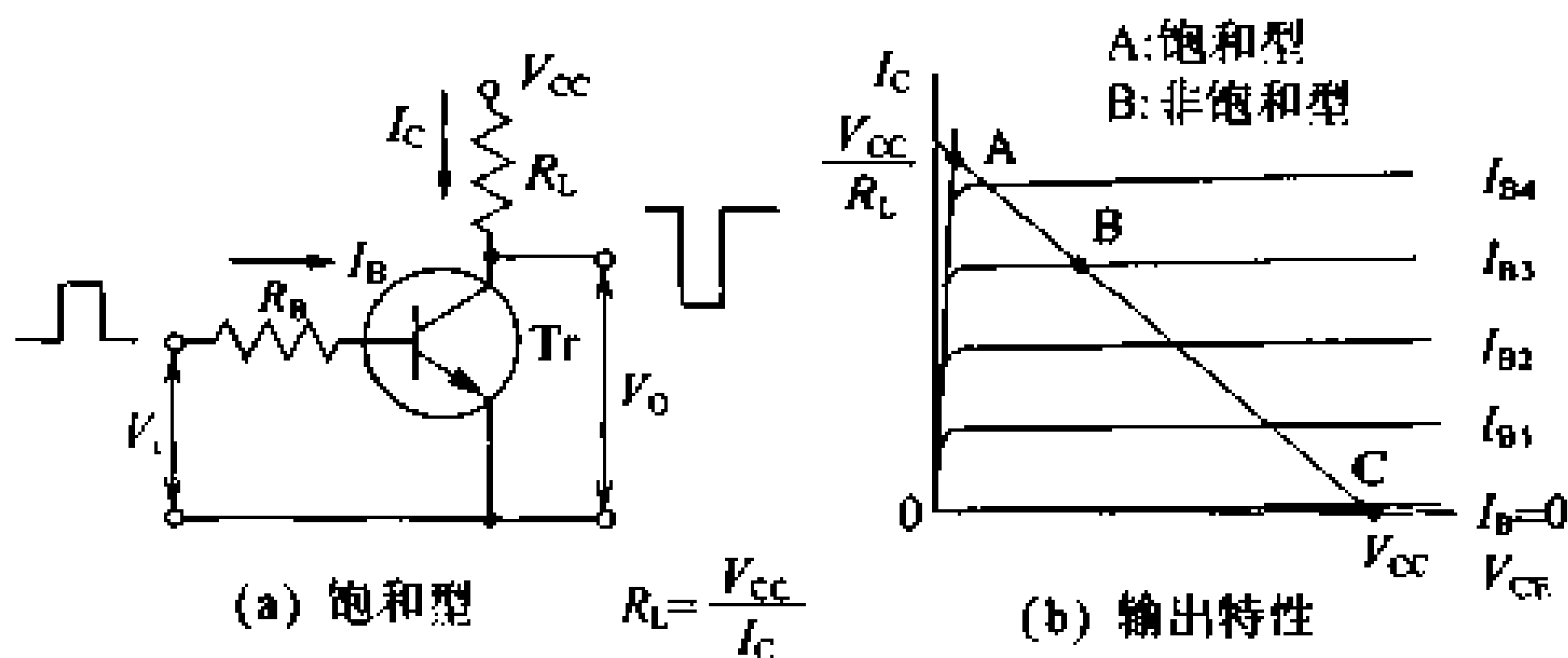


图 4.25 饱和型脉冲放大电路及其输出特性

## ● 非饱和型脉冲放大电路

图 4.26 给出了非饱和型脉冲放大电路的基本电路及其输出特性。该电路的输出端通过二极管接在一低于  $V_{CC}$  的电压  $V$  上。因而,管子导通时集电极的电压  $V_C = V_{CC} - I_C R_2$ ,而如果  $V - V_D > V_C$  则二极管导通,输出电压保持为定值  $V - V_D$  而不再下降。这里,  $V_D$  是二极管导通时的管压降。此时,只要二极管处于导通状态,集电极的电流一直可以增加到  $h_{FE} I_B$ ,其负载线如图 4.26(b) 所示呈折线。

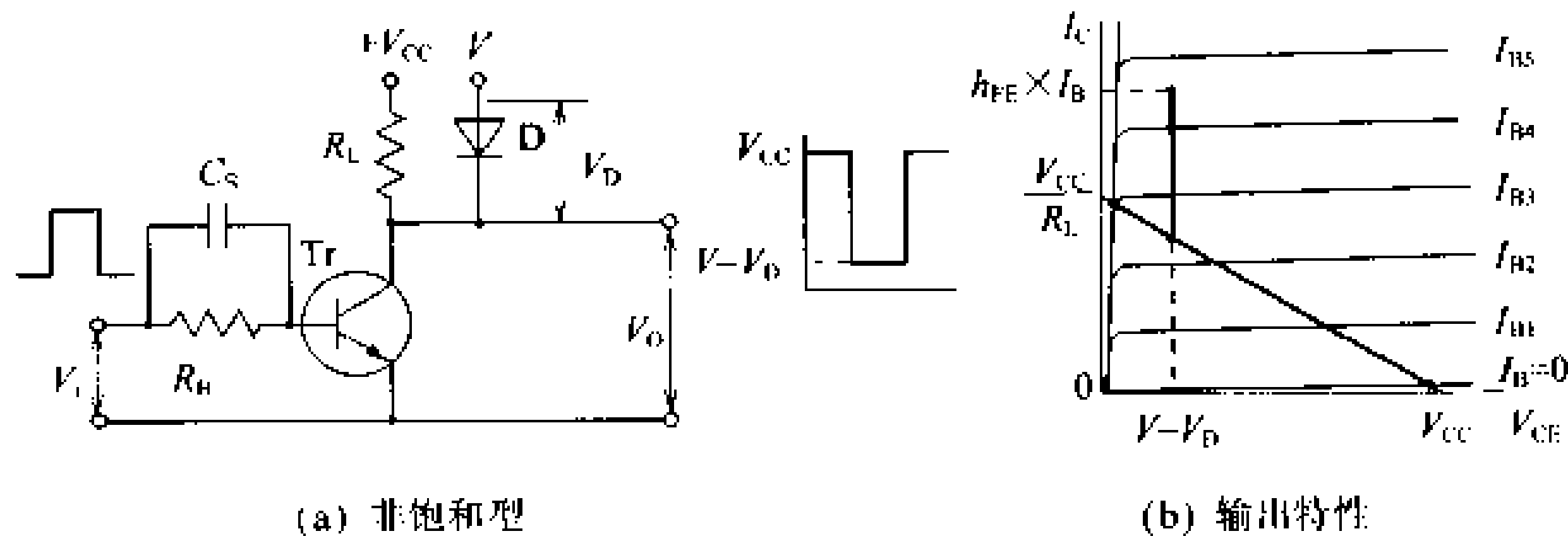


图 4.26 非饱和型脉冲放大电路及其输出特性

## 应用知识

## LED 驱动器中的应用

显示数字或文字时经常使用 LED, LED 的正常工作电流约为  $10 \sim 20\text{mA}$ 。对此, 脉冲放大电路可发挥其特长。

图 4.27 是使用饱和型脉冲放大电路的实例。将 LED 串接在集电极的电路即用来驱动电流容量小的数字器件。图 4.28 是 7 段 LED 显示电路的例子。TC74HC4511P 芯片是集成的 LED 驱动电路。LED 驱动器和 LED 之间的电阻为限流电阻, 通常在  $150\Omega \sim 1\text{k}\Omega$  的范围内选取。

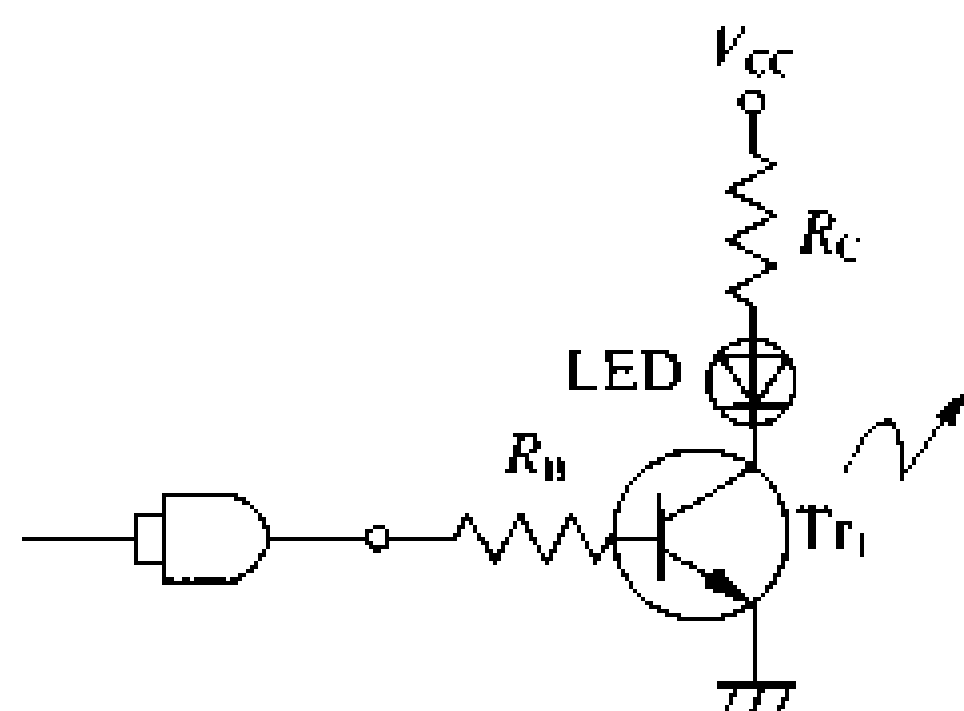


图 4.27 饱和型驱动例

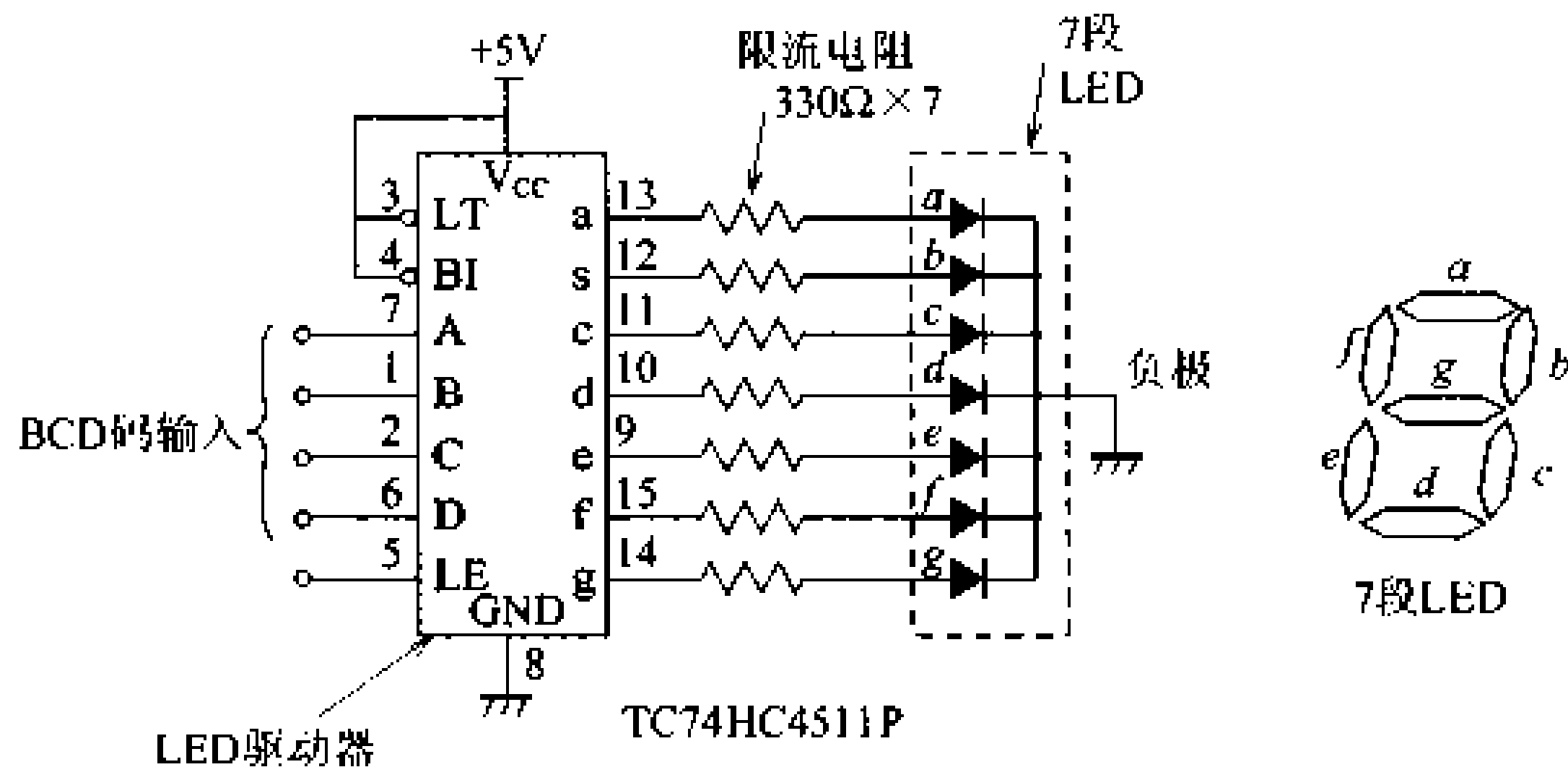


图 4.28 7 段 LED 驱动例

# 9 用 1 和 0 表示数字

□ 要 点

数字电路处理的是 0 和 1 的两值信号,要用这样的信号表示数值,就需要与十进制数不同的特殊的数值表示方法。仅仅使用 0 和 1 来表示数值的数制体系,称为二进制数。

□ 解 释

● 用二进制数表示数字

我们通常使用的十进制数,是用 0~9 来表示数字。例如,用十进制数表示的“413”意味着

$$413=4\times100+1\times10+3=4\times10^2+1\times10^1+3\times10^0。$$

权重

它们的每一位分别具有  $10^2$ 、 $10^1$  等不同的权重。这时的权重是十进制,因而用 10 的乘幂来表示。

二进制数

用只有 1 和 0 的二进制数进行类似的数值表示时,各位的权重则是 2 的乘幂。

例如,用二进制数表示“413”时,与上述表示法类似,可以用 2 的乘幂表示如下:

$$413=1\times2^8+1\times2^7+0\times2^6+0\times2^5+1\times2^4+1\times2^3+1\times2^2+0\times2^1+1\times2^0$$

如图 4.29 所示,各位(0 或 1)的权重按由大到小的顺序从左向右排列。

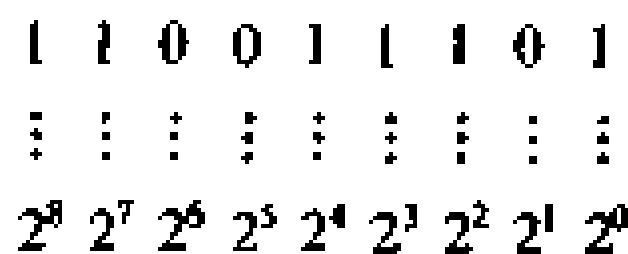


图 4.29 “413”的二进制表示及各位的权重

● bit 和 byte

bit

二进制数的一位,叫做 bit。二进制数的八位,即八 bit,叫做一个字节(byte)(图 4.30)。

字节

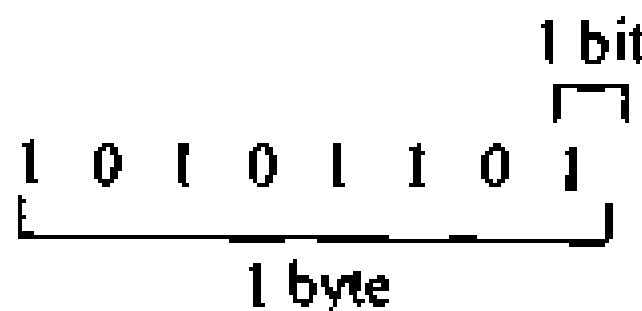


图 4.30 bit 和 byte

### ● 二进制数和十进制数的区别方法

写着个数“1101”，它是二进制的 1101，还是十进制的 一千一百零一，有时很难判断。因此，为区别起见，写的时候，给数值加括号并加注。如十进制数时写成 $(13)_{10}$ ，二进制数时写成 $(1101)_2$ 。

## □ 相关知识 ● 数字电路和二进制数

来考察一下数字电路中一个数值的十进制表达和二进制表达是如何进行的。如图 4.31 所示，假定用灯亮和灯灭来表示数值。用十进制表示一个 3 位数时，因为是十进制，有时要表示的各位数字又相同，这就必须要有 30 个灯(图 4.31(a))。而用二进制时，则只需要 18 个(图 4.31(b))。而且，如果规定用灯灭表示二进制的 0，用灯亮表示二进制的 1，那末，只需要 9 个灯(显示元件)就够了(图 4.31(c))。可见，数字电路中，计算机中处理数据时，使用二进制可比十进制需要的元件少，因而非常经济。

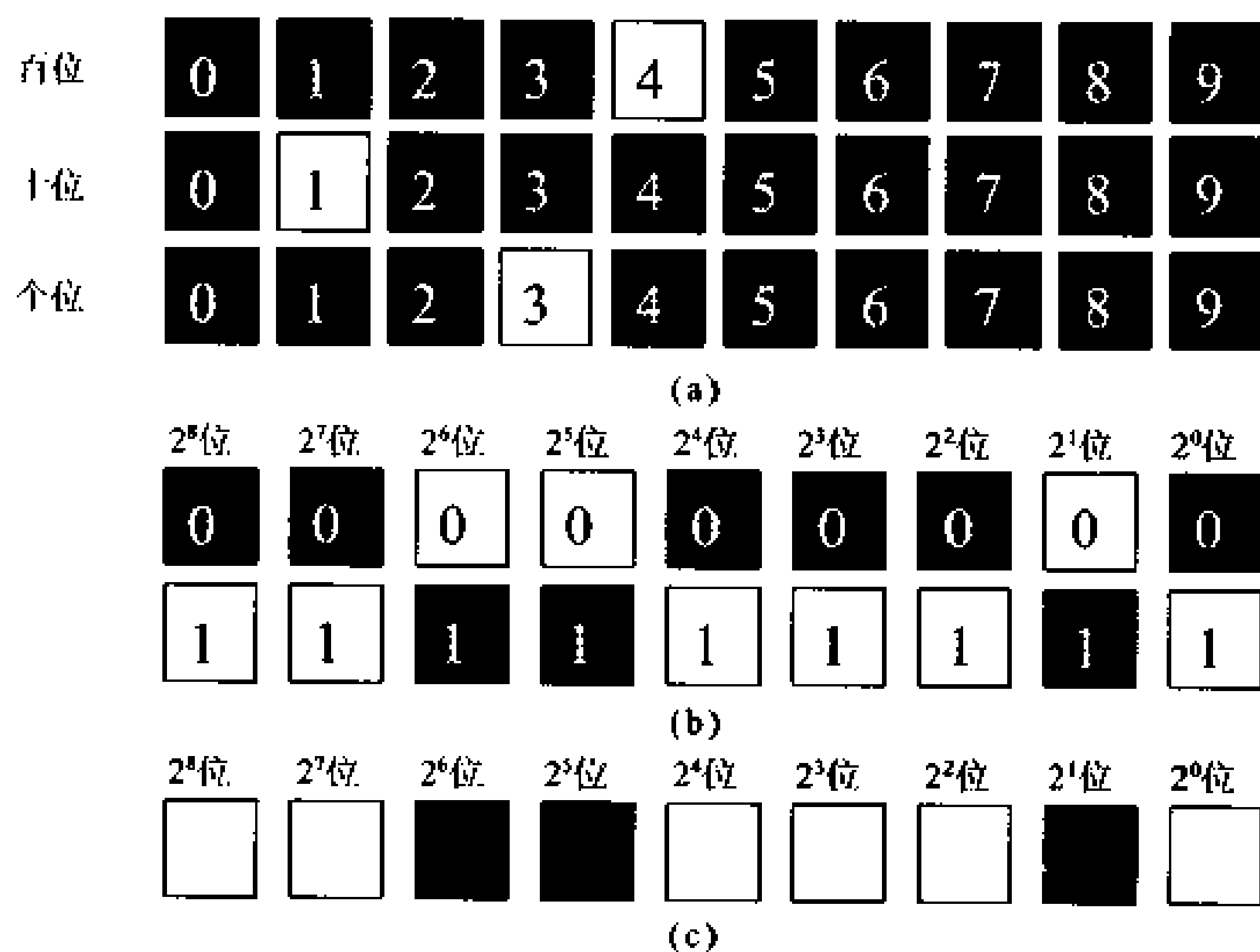


图 4.31 十进制和二进制显示元件数的不同

## 10 二进制数和十进制数间的变换

### □ 要点

假定  $d_i$  是二进制数的一位,  $d_k d_{k-1} \cdots d_1 d_0$  是一个二进制数, 进行二-十进制变换时, 可用下式求得其十进制数  $n$ 。

$$n = 2^k \times d_k + 2^{k-1} \times d_{k-1} + \cdots + 2^1 \times d_1 + 2^0 \times d_0$$

从十进制变为二进制时, 使其值等于  $n$  求各  $d_i$ 。

从二进制变为十进制时, 将各位  $d_i$  代入上式求  $n$ 。

### □ 解释 ● 从十进制向二进制的变换

将十进制数变为二进制数, 即求上述公式右边的各  $d_i$ , 使用图 4.32 所示方法是比较简便的。

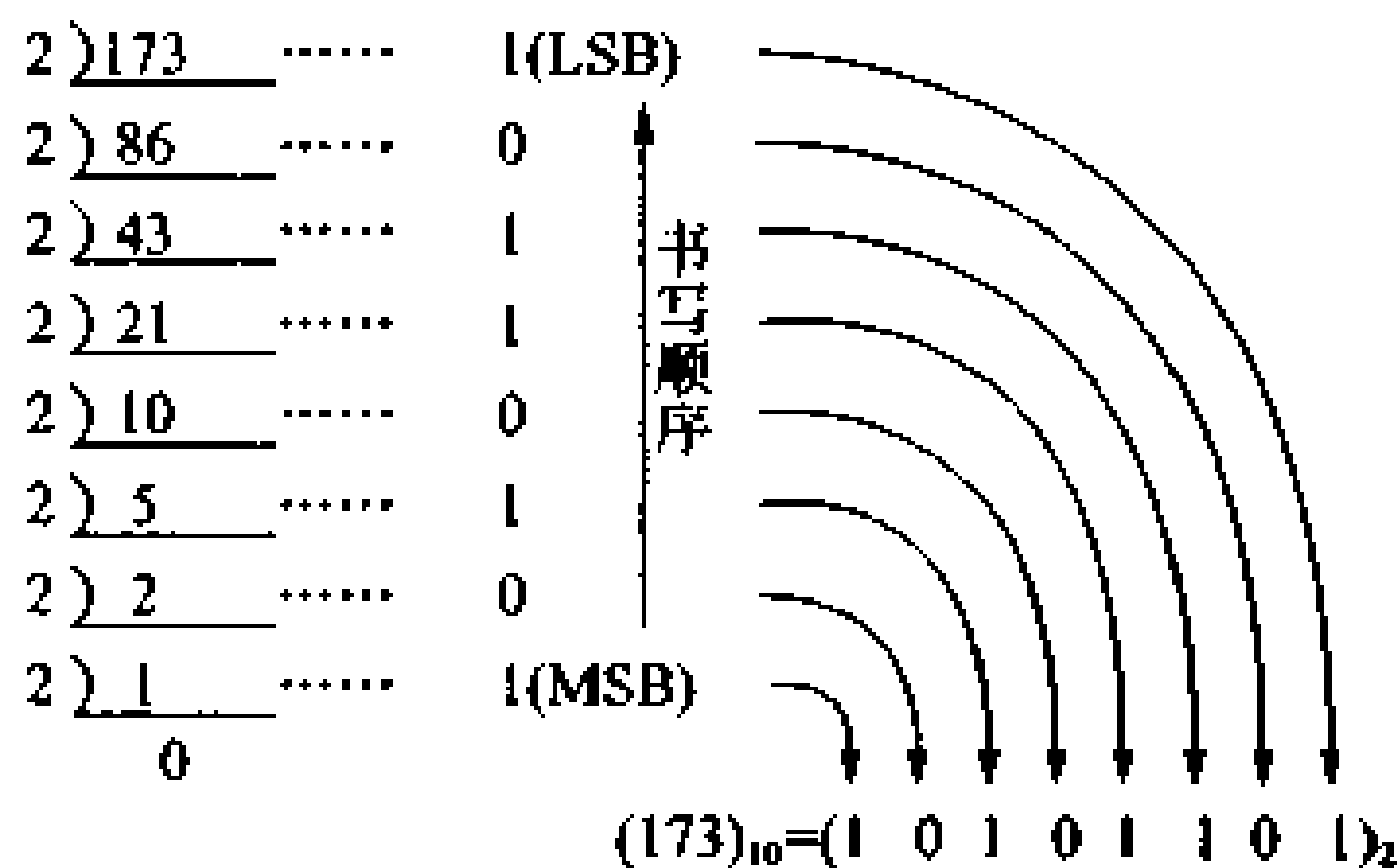


图 4.32 从十进制向二进制变换的方法

首先, 用 2 去除要变换的十进制数, 商写在下边, 余数写在旁边。接着再用 2 去除所得的商, 其商写在下边, 余数写在旁边。重复此过程直至商为 0。

然后, 将写在旁边的最下面的余数作为最高位, 将最上面的余数作为最低位, 顺序排列即为变换结果。

### ● MSB 和 LSB

MSB

LSB

如图 4.32 所示用二进制表示数值时, 其最高位称为 MSB (most significant bit), 最低位称为 LSB (least significant bit)。

### ● 从二进制向十进制的变换

将二进制数变为十进制数时, 将各位与其权重相乘, 再全部加在一起即可。例如, 要将图 4.32 中变得的二进制数再变回为十进制数时, 其计算如下:

$$\begin{aligned}
 (10101101)_2 &= 2^7 \times 1 + 2^6 \times 0 + 2^5 \times 1 + 2^4 \times 0 + 2^3 \times 1 \\
 &\quad + 2^2 \times 1 + 2^1 \times 0 + 2^0 \times 1 \\
 &= (173)_{10}
 \end{aligned}$$

## □ 相关知识 ● 二进制化的十进制法

二进制数是计算机以及数字电路中不能缺少的数值表示方法,但是二进制和十进制间的变换则稍显麻烦。为此,即产生了将十进制数的各位分别变换成四位二进制的数值表示方法。此法称为二进制化的十进制法(binary coded decimal;BCD)。图 4.33 给出了表示实例。此法进行二进制和十进制的变换很简单,但是加减计算时的进位和借位则比较复杂。而且变换后的位数比通常的二进制数的位数还要多。

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} \boxed{9} \\ \vdots \\ 1001 \end{array} & \begin{array}{c} \boxed{8} \\ \vdots \\ 1000 \end{array} & \begin{array}{c} \boxed{7} \\ \vdots \\ 0111 \end{array} & (987)_{10} = (100110000111)_{\text{BCD}}
 \end{array}$$

图 4.33 十进制数的 BCD 码表示法

## ■ 例 题

将十进制数 63 变为二进制数。

**解说** 将十进制数变为二进制数时,使用图 4.32 所示的方法。其计算过程显示在图 4.34 中。

**答**  $(111111)_2$

$$\begin{array}{rcl}
 2 \overline{) 63} & \cdots \cdots & 1 \text{ (LSB)} \\
 2 \overline{) 31} & \cdots \cdots & 1 \\
 2 \overline{) 15} & \cdots \cdots & 1 \\
 2 \overline{) 7} & \cdots \cdots & 1 \\
 2 \overline{) 3} & \cdots \cdots & 1 \\
 2 \overline{) 1} & \cdots \cdots & 1 \text{ (MSB)} \\
 \hline
 & 0 & \\
 & (63)_{10} = (111111)_2 &
 \end{array}$$

↑ 书写顺序

图 4.34 将  $(63)_{10}$  从十进制数变为二进制数

# 11 二进制和十六进制间的变换

## □ 要点

从二进制向十六进制变换时,只需将二进制数从最低位开始每四位断开,即可方便地将其变为十六进制。从十六进制向二进制变换时,将十六进制数的每位都变为二进制的四位即可。

## □ 解释 ● 二进制和十六进制的关系

十六进制是指将十进制 0~15 都可以作成一位的数值体系。由于 10~15 不能原封不动地表示成一位,因而采用下述的表示

10→A    11→B    12→C    13→D    14→E    15→F

二进制四位可以表示 0~15。即二进制四位对应十六进制一位。而且,按十六进制表示,可以减少按二进制表示所引起的很多的位数。

## ● 从二进制向十六进制的变换

从二进制向十六进制变换时,如图 4.35 所示,首先将二进制数从最低位开始每四位断开,然后将每段二进制四位变换为十六进制一位。不改顺序将其连写在一起,即为变换结果。

## ● 从十六进制向二进制的变换

将十六进制数变换为二进制数时,如图 4.36 所示,要将十六进制数的每位变换为二进制数。变换后的二进制数不足 4 位的(十六进制数中的 F 以下),数前用 0 补足 4 位。然后不改顺序将其连写在一起,即为变换结果。

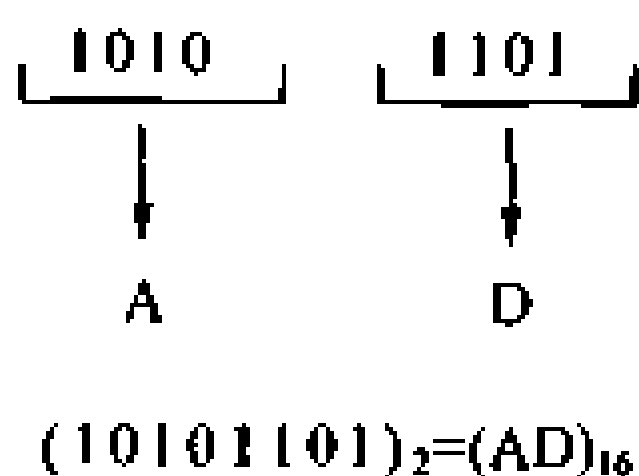


图 4.35 从二进制向十六进制的变换

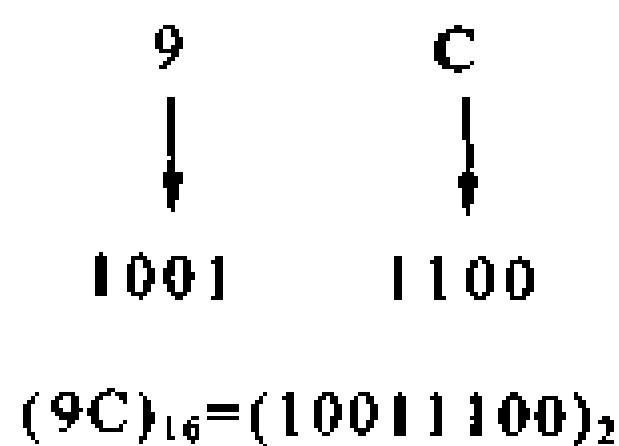


图 4.36 从十六进制向二进制的变换

## □ 相关知识 ● 十六进制数的表示方法

为表示其为十六进制数,有采用(9D)<sub>16</sub>方式的,但一般都表示成 9DH(或 9Dh)那样,在数值的后边带个 H(或 h)。H 是 Hexadecimal(意为十六进制)的字头。存储器的地址多用带 H 的十六进制数表示。



### ● 十进制和十六进制的变换

从十进制变换到十六进制,如图 4.37 所示,将要变换的十进制数用 16 去除,余数写在旁边,商写在下边。对所得的商进行同样的操作。重复此过程直至商为 0。然后,将最下边的余数作为最高位,最上边的余数作为最低位,连写在一起即为变换结果。

$$\begin{array}{r}
 16 \overline{) 173} \cdots \cdots 13 \rightarrow D \\
 16 \overline{) 10} \cdots \cdots 10 \rightarrow A \\
 \quad 0 \\
 (173)_{10} = (AD)_{16}
 \end{array}$$

图 4.37 从十进制向十六进制的变换

将十六进制数变为十进制数时,将其各位与其权重相乘即可。若将图 4.37 中得到的十六进制数再变为十进制数时,其计算如下。

$$(AD)_{16} = 16^1 \times 10 + 16^0 \times 13 = (173)_{10}$$

### ● 为什么将二进制数四位断开就可以变为十六进制数

这一变换有其理论背景。如图 4.38 所示,A 为 8 位二进制数( $d_i$  为二进制的一位),B 为与 A 同值的十六进制数( $h_i$  为十六进制的一位),其中①的部分与  $h_1$  对应,②的部分与  $h_0$  对应。①和②就都是二进制的 4 位,将其变换成十六进制的 1 位,即可得到十六进制数。

$$\begin{aligned}
 & (d_7 d_6 d_5 d_4 d_3 d_2 d_1 d_0)_2 \quad \text{----- A} \\
 & = d_7 \times 2^7 + d_6 \times 2^6 + d_5 \times 2^5 + d_4 \times 2^4 \\
 & \quad + d_3 \times 2^3 + d_2 \times 2^2 + d_1 \times 2^1 + d_0 \times 2^0 \\
 & = \underbrace{(d_7 \times 2^3 + d_6 \times 2^2 + d_5 \times 2^1 + d_4 \times 2^0)}_{\text{①} \rightarrow h_1} \times \underbrace{2^4}_{16^1} \\
 & \quad + \underbrace{(d_3 \times 2^3 + d_2 \times 2^2 + d_1 \times 2^1 + d_0 \times 2^0)}_{\text{②} \rightarrow h_0} \times \underbrace{2^0}_{16^0} \\
 & = (d_7 \times 2^3 + d_6 \times 2^2 + d_5 \times 2^1 + d_4 \times 2^0) \times 16^1 \\
 & \quad + (d_3 \times 2^3 + d_2 \times 2^2 + d_1 \times 2^1 + d_0 \times 2^0) \times 16^0 \\
 & = h_1 \times 16^1 + h_0 \times 16^0 \\
 & = (h_1 h_0)_{16} \quad \text{----- B}
 \end{aligned}$$

图 4.38 二进制 4 位与十六进制 1 位的对应

## 12 二进制小数的表示方法

### □ 要 点

为用二进制表示小数, 设  $n$  为十进制小数,  $d_i$  为二进制的位, 则有

$$n = 2^{-1} \times d_1 + 2^{-2} \times d_2 + 2^{-3} \times d_3 + \cdots + 2^{-m} \times d_m + \cdots$$

据此, 求出  $d_i \approx 0$  或  $d_i \approx 1$ , 写成  $0.d_1d_2\cdots d_{k-1}d_k$  即可。

### □ 解 释 ● 二进制小数

二进制小数各位的权重为 2 的负幂。即分别为  $2^{-1} \approx 0.5$ ,  $2^{-2} \approx 0.25$ ,  $\cdots$  等。当用二进制表示小数时, 为使与原十进制小数相等, 有的权重要计入算式 ( $d_i = 1$ ), 有的权重则不要计入算式 ( $d_i = 0$ ), 由此确定出的  $d_i$  写成  $0.d_1d_2\cdots d_{k-1}d_k$  即可。

例如, 用二进制表示十进制小数  $(0.6875)_{10}$ , 则为

$$\begin{aligned} (0.6875)_{10} &\approx 0.5 \times 1 + 0.25 \times 0 + 0.125 \times 1 + 0.0625 \times 1 \\ &\approx 2^{-1} \times 1 + 2^{-2} \times 0 + 2^{-3} \times 1 + 2^{-4} \times 1 \\ &\approx (0.1011)_2. \end{aligned}$$

### ● 变换为二进制小数的简便方法

如图 4.39 所示, 用 2 去乘要变为二进制的小数。将其结果的整数部分写在旁边, 而将其小数部分与前面的小数对齐写在其下。对此小数部分再乘 2, 将其结果的整数部分写在旁边, 小数部分写在下边。重复此过程直至小数部分为 0。然后, 将写在旁边的 1 和 0 从上边开始顺序写在“0.”。之后, 即为变换结果。

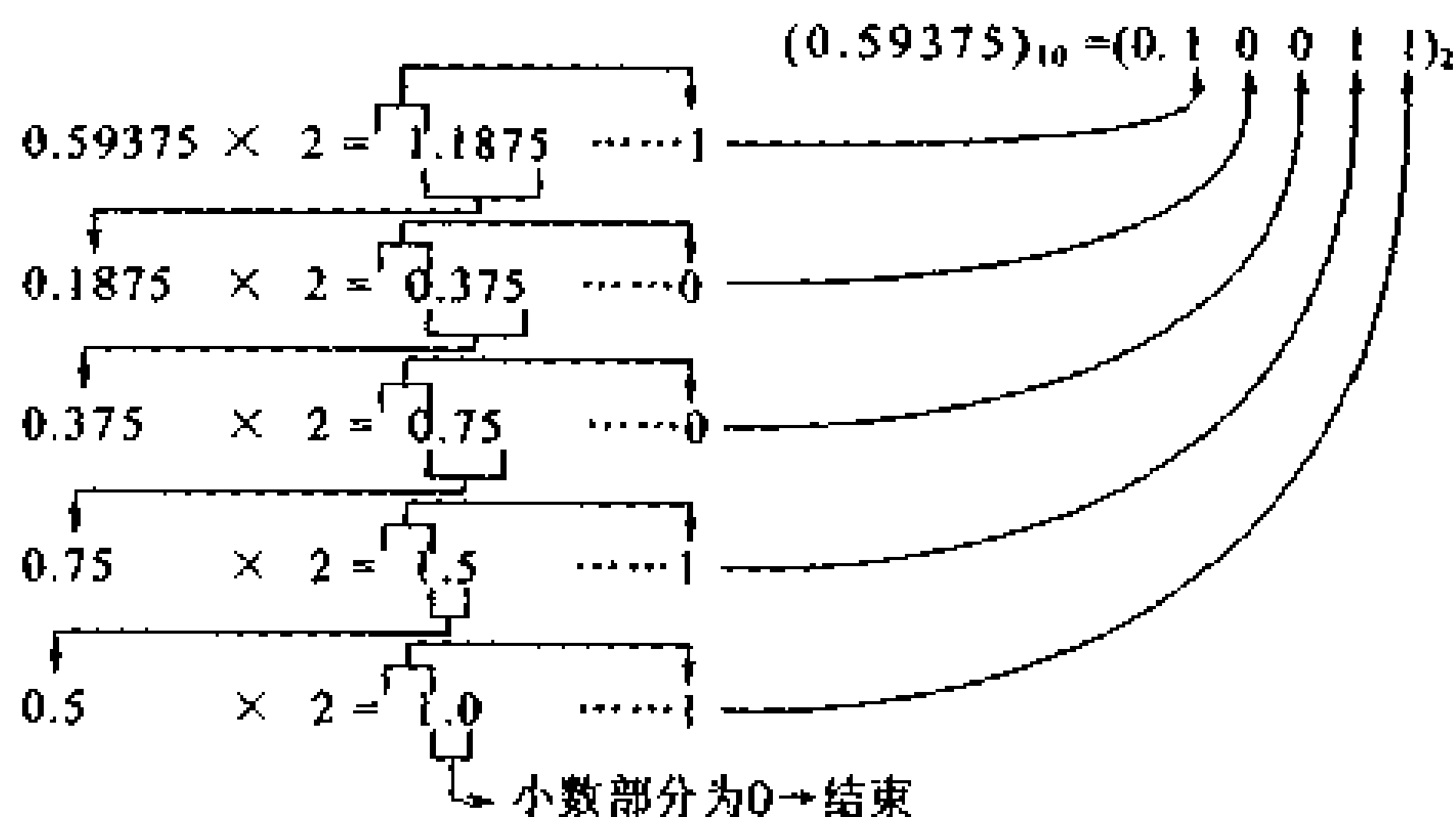


图 4.39 将小数变为二进制

## 相关知识 ● 固定小数点表示和浮动小数点表示

舍尾误差  
指数表示

假数 基数  
指数  
正规化

浮动小数点表示  
固定小数点表示

例如,对于二进制小数  $(0.000000001)_2$  ( $\cdots$   
 $(0.0001953125)_{10}$ ),当小数点后能够显示的位数只有8位时,最后的1就得舍去而被当做零对待。由此引起的与原数值的差称为舍尾误差。而使用指数表示方法时,上述数值的二进制指数表示则为  
 $(0.000000001)_2 = (0.1)_2 \times 2^{-9}$

这里,  $(0.1)_2$  称为假数,  $2^{-9}$  的2称为基数,  $-9$  称为指数。因为是二进制,所以基数为2。而且,为了尽量减少被舍弃的位数,应将假数的  $2^{-1}$  部分(小数点的紧右边)变为1。这叫做正规化。这一正规化的二进制数,在计算机内部是以图4.40所示的形式被存储记忆。原小数的小数点位置可以移动表示方法称为浮动小数点表示,而小数点位置不动表示方法称为固定小数点表示。

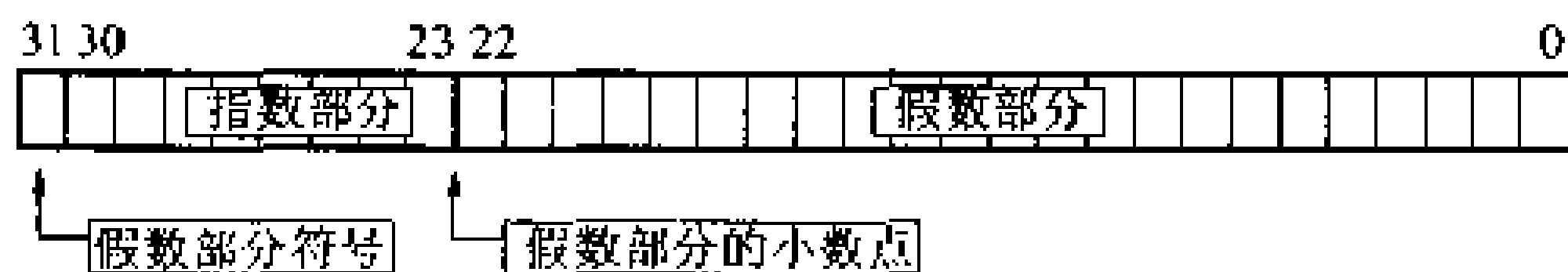


图 4.40 计算机内部的小数表示方法

## 例 题

将  $(81.1721)_{10}$  用二进制数表示。

**解说** 将1以上的实数用二进制表示时,应将其整数部分和小数部分分别变为二进制。 $(81)_{10} = (1010001)_2$ ,小数部分可利用图4.39的方法变为二进制。这个例子中,图4.39的小数部分永不为0。

**答**  $(81.1721)_{10} = 1010001.0010110\cdots$

# 13 二进制的加法和减法

## □ 要 点

二进制加法,同位间使用以下四个算式进行计算。  
 $0+0=0, 1+0=1, 1+1=10, 1+1+1=11$   
二进制减法,先求减数的2的补数,再按加法进行计算。

## □ 解 释 ● 二进制的加法

二进制加法,像笔算那样,从后向前做加法是很简单的。图 4.41 给出了(38+71=109)的计算实例。1+1 时有进位,本位为 0,上一位加此进位 1。进位后会遇到 1+1+1 的计算,此时本位为 1,上一位加进位 1。

进位

11

00100110

+ 01000111

01101101

图 4.41 二进制加法

### ● 补 数

计算机做减法时,不用减法器而只用加法器进行计算,这就需要使用补数。表示负数时也要用补数。图 4.42 示出了补数的计算方法。首先,对要求补的二进制数的所有各位进行 0、1 间的反转。这叫做 1 的补数。然后对此补数的最低位加 1,其结果称为 2 的补数。

补数

- 1 的补数
- 2 的补数

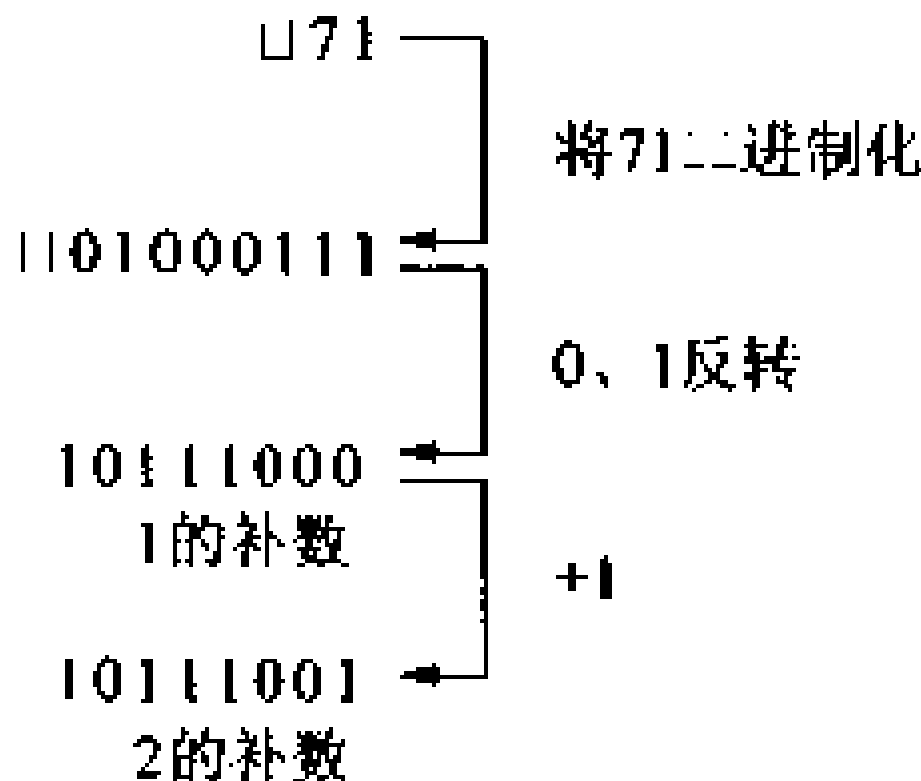


图 4.42 2 的补数及计算方法

### ● 二进制的减法

二进制的减法,如图 4.43 所示,首先求减数的 2 的补数,然后按二进制加法的规则做加法即可。其结果有进位时(图 4.43 (a)),去掉进位位即为其答案,符号为正(+),无进位时(图 4.43 (b)),需对此结果求 2 的补数即为其答案,符号为负(-)。

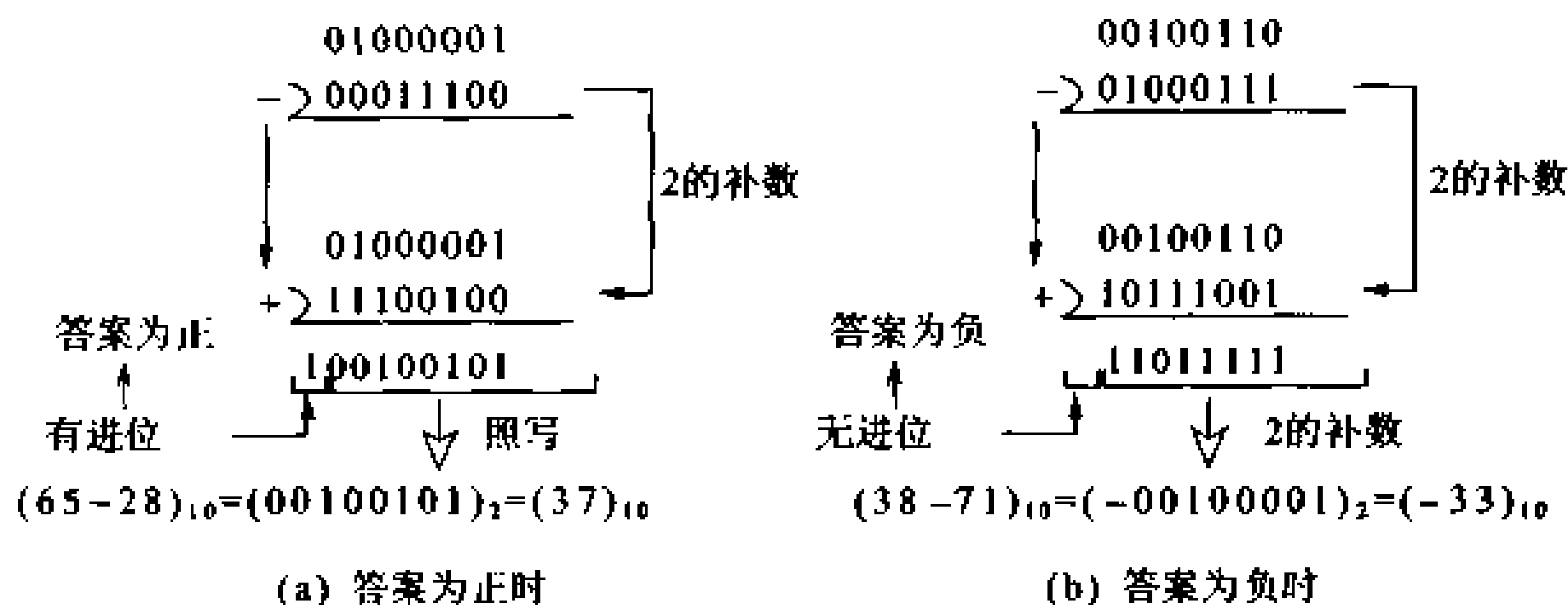


图 4.43 二进制的减法

### □ 相关知识 ● 补数的概念

补数是借助于比欲求补的数值多 1 位且最高位为 1 其余皆为 0 的数值来获得的,如

$$2^8 - 71 = 100000000 - 01000111 = 10111001$$

即为 71 的 2 的补数。

同理,十进制数 811 的补数,可借助于 1000,得到其补数,为 10 的补数 189(189 称为对十进制数的 10 的补数)。

### ■ 例 题

有二进制数 A,B;  $A=01010101$ ,  $B=01100110$ ,  $A+B$  的计算结果是下边的哪一个?

- a. 01101010; b. 01111010; c. 10011010;  
d. 10111011; e. 11010101。

**解说** 使用图 4.41 所示的方法计算,具体过程如图 4.44 所示。

**答** d。

$$\begin{array}{r}
 \text{进位} \rightarrow 1 \quad 1 \\
 01010101 \\
 + 01100110 \\
 \hline
 10111011
 \end{array}$$

图 4.44 二进制计算式

# 14 数字 IC

## 要 点

数字 IC(数字集成电路)是用来处理高低电平信号、对输入的电平状态进行运算和输出的电路元件。因而广泛用于逻辑电路的组成以及进行二进制运算。根据其功能和形状的不同分为很多种,分别用于不同的用途。

## 解 释 ● 数字 IC

数字 IC 用于处理低电平为 0、高电平为 1 的数字信号。对于输入信号进行该 IC 所规定的运算,并能得到或 0 或 1 的输出。图 4.45 给出了数字 IC 输入数字信号的两个例子。

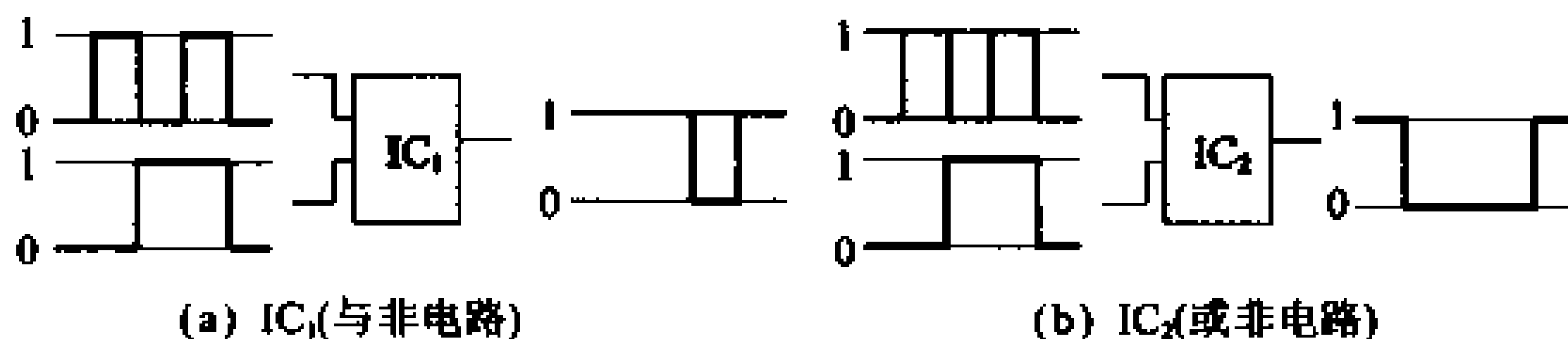


图 4.45 数字 IC 输入数字信号的例子

## ● 数字 IC 的分类

数字 IC 根据所用半导体材料的种类、外形、可进行的运算,分成很多品种进行生产和销售。

按照半导体材料的种类,可分为双极性的 TTL(transistor-transistor logic,晶体管-晶体管逻辑)电路和单极性的 MOS(metal oxide semi-conductor,金属氧化物半导体)电路两类。

按照外观分类,有 SIP(single inline package,单列式封装)、DIP(dual inline package,双列式封装)和 PGA(pin grid array package,阵列式引脚封装)等。

按照所进行的运算分类,可分为 NOT(非门)、AND(与门)、OR(或门)、NAND(与非门)、NOR(或非门),以及由它们构成的双稳态多谐振荡器、计数器等。这些都是逻辑电路中常用的基本元件。

## ● TTL

TTL 电路是将 PNP 或 NPN 晶体管组合在一起制造的数字 IC。这种半导体工作时,多数载流子和少数载流子两者都要使用,因而也称为双极型。耗电多,但动作速度快。

SIP DIP  
PGA

### ● MOS

MOS 电路,是将使用金属氧化物接触的场效应管组合在一起制成的数字 IC。工作中只使用多数载流子,因而也称为单极型。允许电源电压变化大,耗电小,噪声大,一般用于低速电路。

### □ 相关知识 ● IC 的封装

IC 因其内部构造、安装场所及引脚数量的不同而形状各异。图 4.46 示出了部分外观。其中,(a)为 SIP 型,其引脚排成一行,(b)为 DIP 型,其引脚排为两列,这种形式最为常见,(c)为 PGA 型,其引脚排成阵列,CPU 常作成此种形状。也有图 4.47 所示的形状,这种 IC 可直接焊在无需打孔的电路板上。

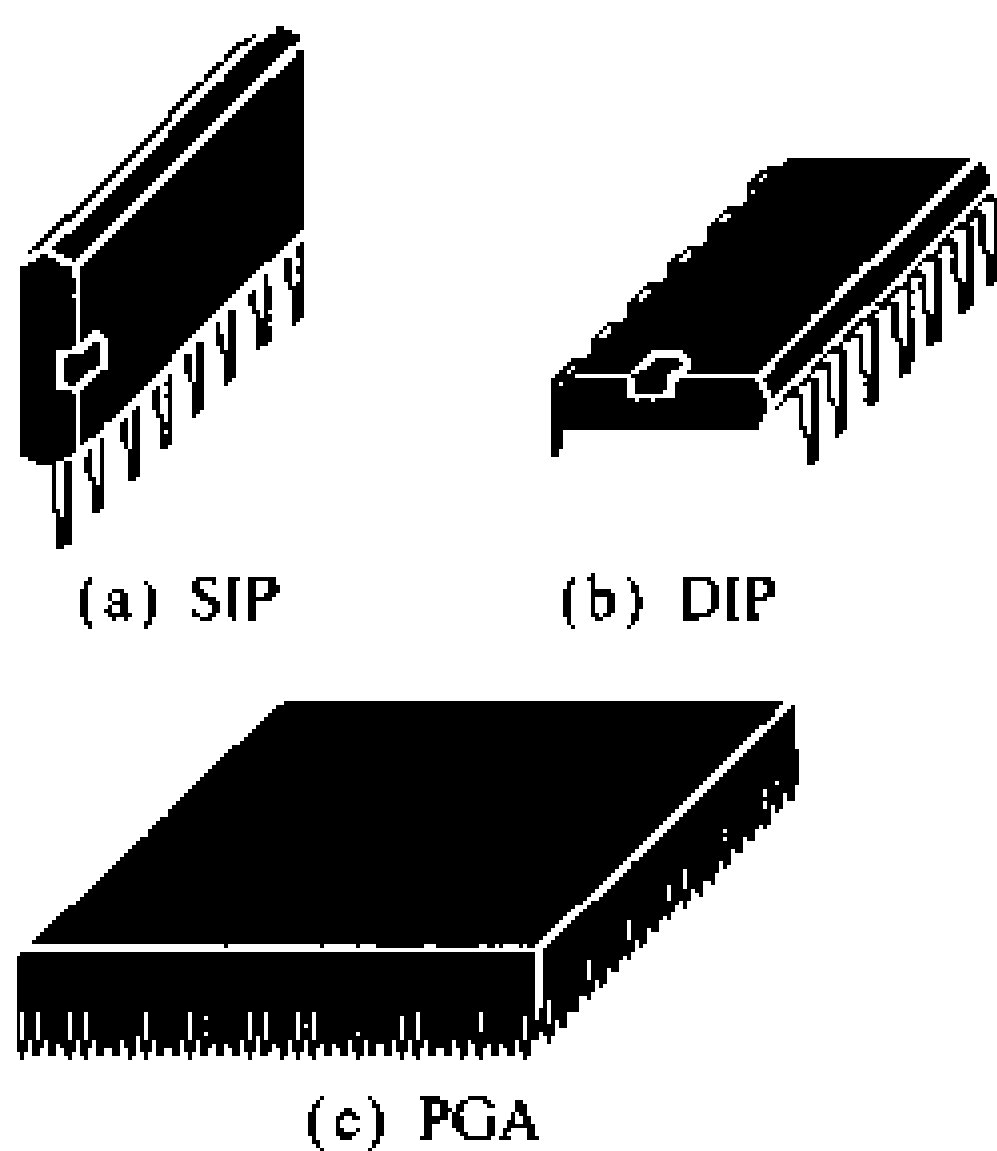


图 4.46 数字 IC 的封装

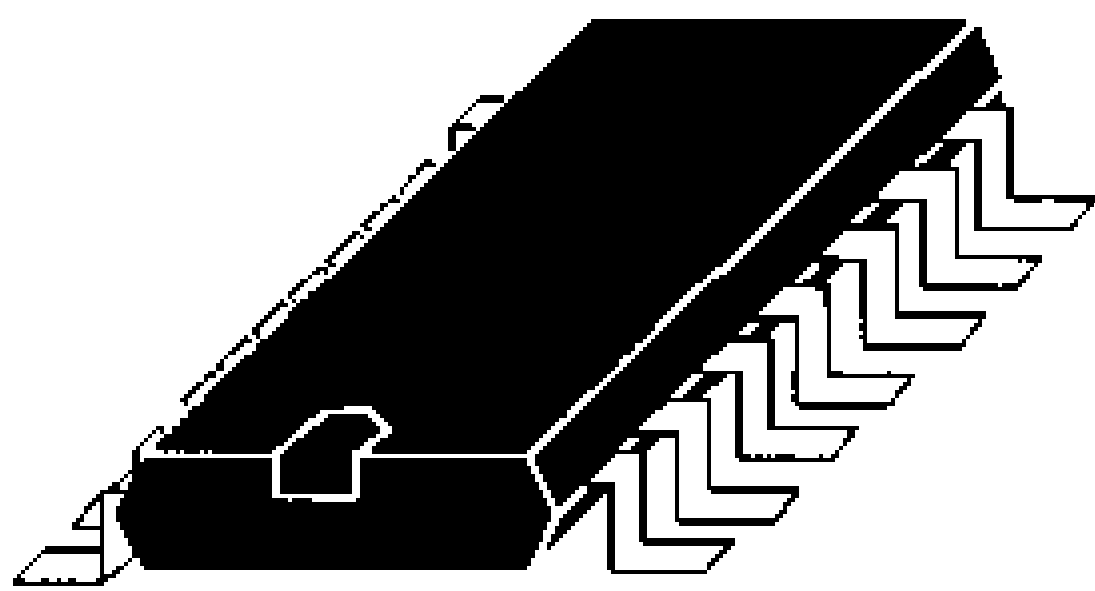


图 4.47 电路板无需打孔的数字 IC

# 15 逻辑电路基础

□ 要 点

逻辑电路是用 1 和 0 进行运算,即进行逻辑运算的电路。基本的逻辑电路有 NOT(非)电路、AND(与)电路与 OR(或)电路。

□ 解 释

逻辑电路

● NOT 电路

NOT 电路,顾名思义,是否定输入信号的逻辑电路。因为只处理 0 和 1,也可称为输入反转电路、非电路。图 4.48 示出了 NOT 电路的实际电路。此电路中,设电源电压  $V_{CC}=5V$ ,其输入输出均是以 0V 为 0,以 5V 为 1。

输入为 0,即 0V 时,管子的基极无电流,集电极也无电流,因而  $R_2$  上无压降,输出电压与  $V_{CC}$  相同,为 5V,即输出为 1。

输入为 1,即 5V 时,管子的基极有电流  $I_B$  流过,集电极有电流  $I_C$  流过,集电极与发射极之间几乎无电压降,因而输出电压近于 0V,即输出为 0。

真值表

表 4.2 是考虑了 NOT 电路的所有输入输出关系的真值表。

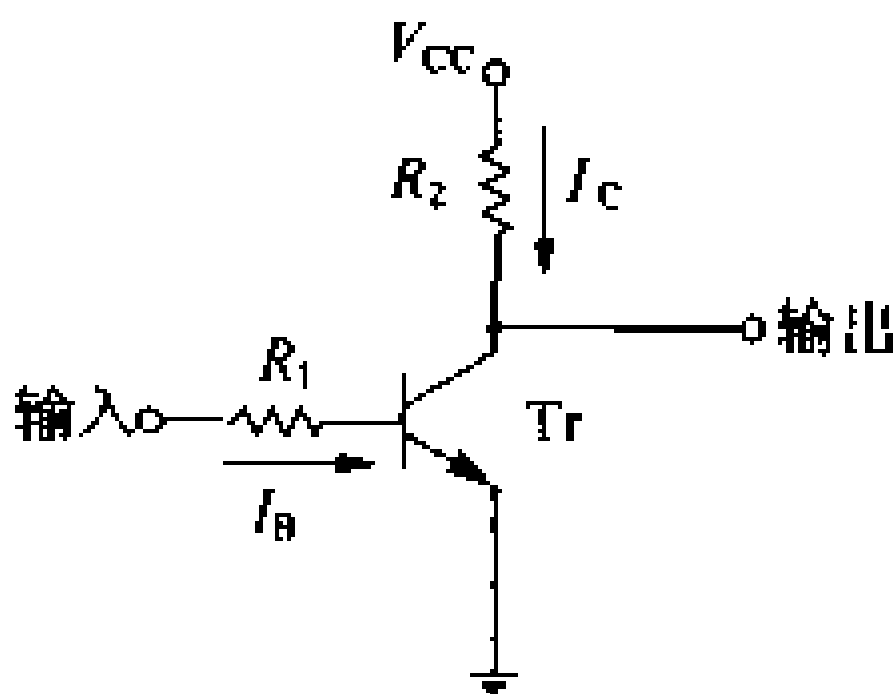


图 4.48 NOT 电路

表 4.2 NOT 电路的真值表

输入	输出
0(0V)	1(5V)
1(5V)	0(0V)

● AND 电路

AND 电路是输入全为 1 时输出为 1 的逻辑电路。图 4.49 给出了有两个输入的实际 AND 电路。电路中,电源电压  $V_{CC}=5V$ ,输入输出的 0V 为 0,5V 为 1。

输入全为 0,即 0V 时,输入端和  $V_{CC}$  间有电流流通,输出电压近乎 0V。即使给其中一个输入端加上 5V 电压,由于二极管的作用,输出仍为 0。

输入全为 1,即全为 5V 时,输入端 1、2 与  $V_{CC}$  电位相同,二极管  $D_1$ 、 $D_2$  中无电流流通,输出电压为电源电压 5V,即输出为 1。表 4.3 为此 AND 电路的真值表。从表可知,AND 电路可以说就是乘法电路。



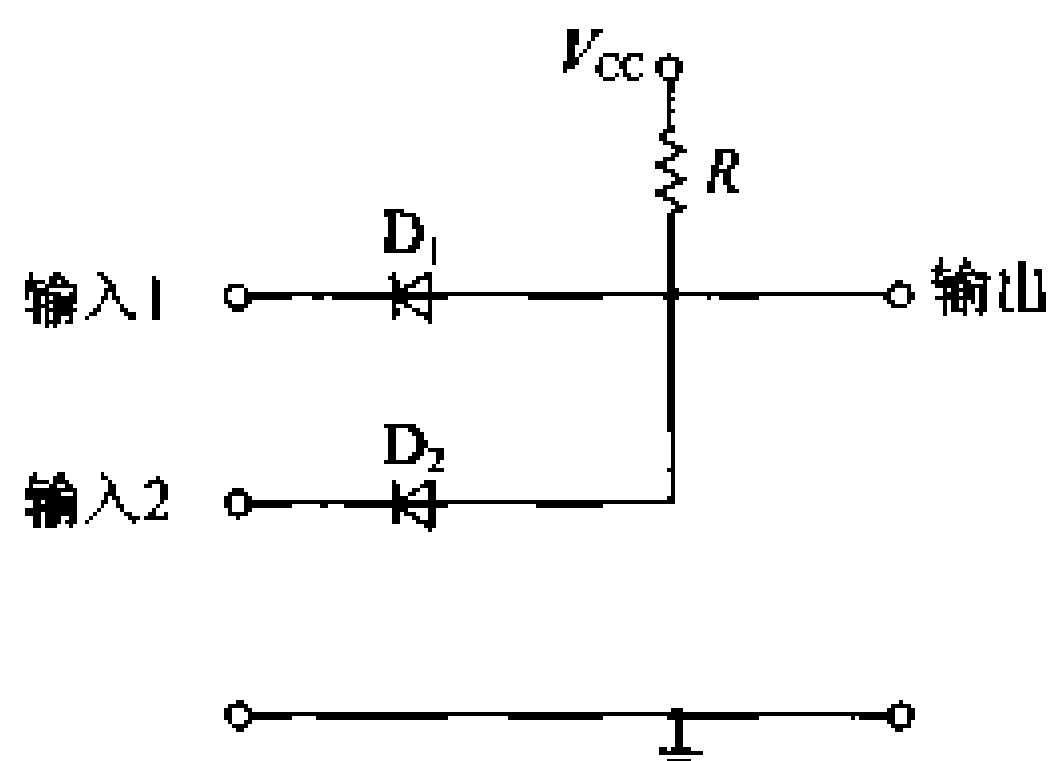


图 4.49 AND 电路

表 4.3 AND 电路的真值表

输入 1	输入 2	输出
0(0V)	0(0V)	0(0V)
0(0V)	1(5V)	0(0V)
1(5V)	0(0V)	0(0V)
1(5V)	1(5V)	1(5V)

### ● OR 电路

OR 电路是输入只要有 1 时输出即为 1 的逻辑电路。图 4.50 给出了有两个输入端的实际的 OR 电路。电路中,输入输出的 0V 为 0,5V 为 1。

输入全为 0,即 0V 时,二极管  $D_1$ 、 $D_2$  中均无电流,因而输出与地同,为 0V,即输出为 0。

输入只要 1 个为 1,即 5V 时,二极管就有一个导通,输出即与输入同为 5V,即输出为 1。

表 4.4 为此 OR 电路的真值表。从表可知,OR 电路可以认为是不进位的加法电路。

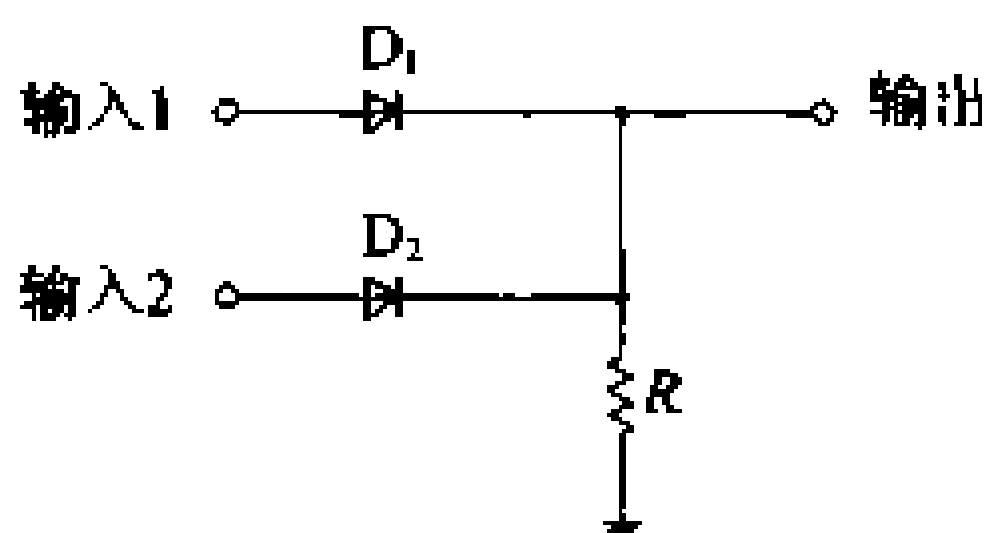


图 4.50 OR 电路

表 4.4 OR 电路的真值表

输入 1	输入 2	输出
0(0V)	0(0V)	0(0V)
0(0V)	1(5V)	1(5V)
1(5V)	0(0V)	1(5V)
1(5V)	1(5V)	1(5V)

## □ 相关知识 ● 逻辑电路的符号

NOT 电路、AND 电路和 OR 电路均有一简单的符号,用来代替图 4.48~图 4.50 中实际电路图的绘制。这些符号显示在图 4.51 中,叫做逻辑电路符号。图 4.51 的这些符号还特别称作 MIL 符号(军用标准符号,military standard 符号),是一种使用非常广泛的符号。

逻辑电路符号  
MIL 符号

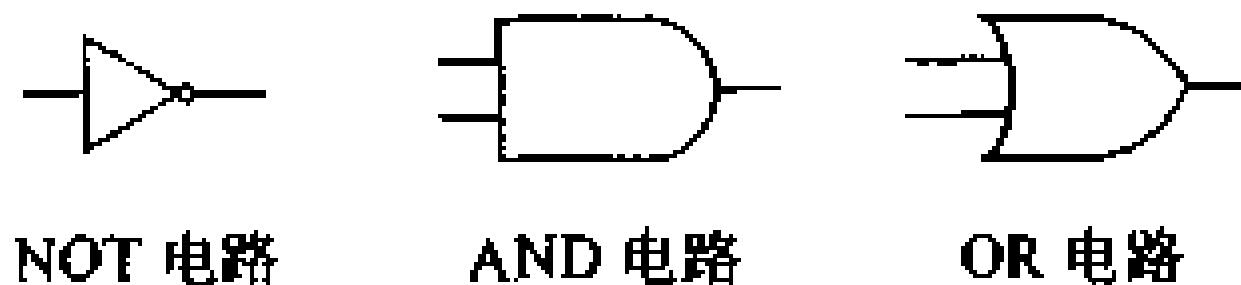


图 4.51 逻辑电路符号(MIL 符号)

● 正逻辑和负逻辑

正逻辑  
负逻辑

一般逻辑电路中,将低电平当作逻辑 0,将高电平当作逻辑 1。但是也可以把低电平当作 1 而把高电平当作 0。前者称为正逻辑,后者称为负逻辑。

表 4.5 给出的是 AND 电路的负逻辑真值表,与表 4.3 相比正好相反,但是与表 4.4 的 OR 电路的作用则相同。因此,为区分正负逻辑,如图 4.52 所示,在电路输入端标一个圆圈用以表示负逻辑。逻辑运算以及表示输出时使用 OR+NOT(NOR,或非)电路符号。

表 4.6 是 OR 电路的负逻辑真值表。与表 4.4 相比正好相反,而与表 4.3 的 AND 电路的作用则相同。因此,用负逻辑表示 OR 电路时,应如图 4.53 所示,在输入端标上圆圈。逻辑运算以及表示输出时使用 AND+NOT(NAND,与非)电路符号。

表 4.5 负逻辑 AND 电路

真值表		
输入 1	输入 2	输出
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

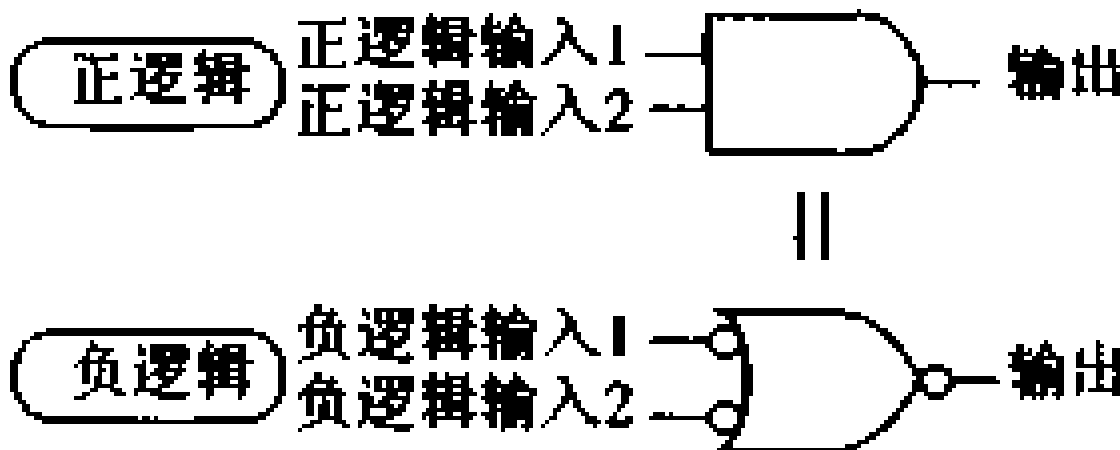


图 4.52 AND 电路的正、负逻辑

表 4.6 负逻辑 OR 电路

真值表		
输入 1	输入 2	输出
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

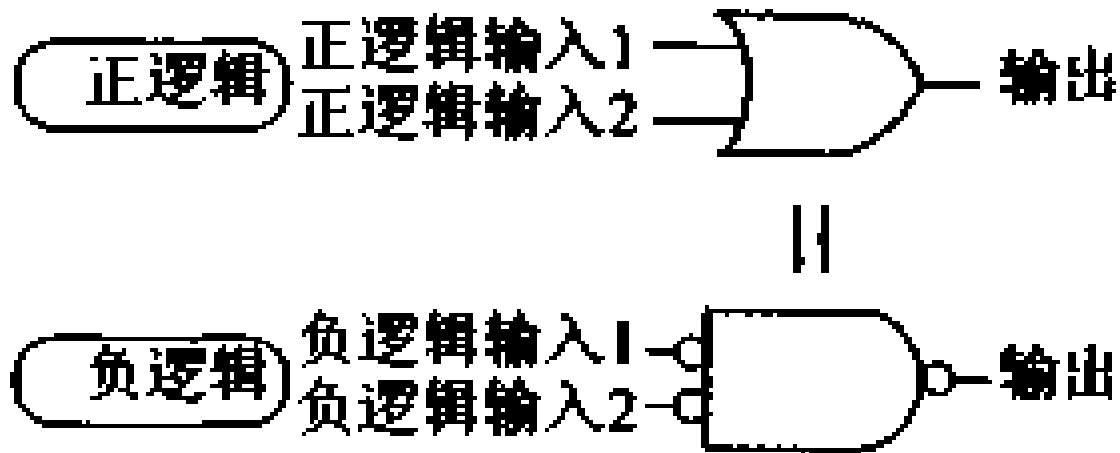


图 4.53 OR 电路的正、负逻辑

### ● 门限电压

在图 1.48~图 1.50 的逻辑电路中,是将逻辑 0 当作 0V、逻辑 1 当作 5V 进行说明的。实际上,在使用晶体管及二极管的电路中,作为逻辑 0 的端口,电压常常在 0V 以上,而作为逻辑 1 的端口,电压则常常在 5V 以下。加之信号上还叠加噪声时,如果只将严格的 0V 和 5V 认作逻辑 0 和逻辑 1,就很难正确区分逻辑信号的 0 和 1。

门限

因此,就要设计一个界限,规定 0~5V 之间电压不足多少算作 0、电压超过多少算作 1。所规定的这个电压就叫做门限(threshold)电压。可见,在这个门限电压附近半导体的工作是不稳定的。因此,实际上是把 0.6V 以下认作 0,而把 2.5V 以上认为作 1。

由于有这个门限设定,尽管晶体管和二极管上有管压降,尽管信号中多少也有点噪声混入,都不妨碍 0 和 1 信号的正确区分。

### ■ 选修知识

要将 AND 和 OR 电路分别变换为 OR 和 AND 电路时,只需如图 4.54 所示,将原来标的圆圈去掉,原来未标的添上即可。图 4.52 和图 4.53 也就是这种变换的例子。

这种变换,是由布尔代数 AND 和 OR 互变法则(德·摩根定理)理论上推导出来的。图 4.55 给出了德·摩根定理公式及相应的逻辑电路变换。

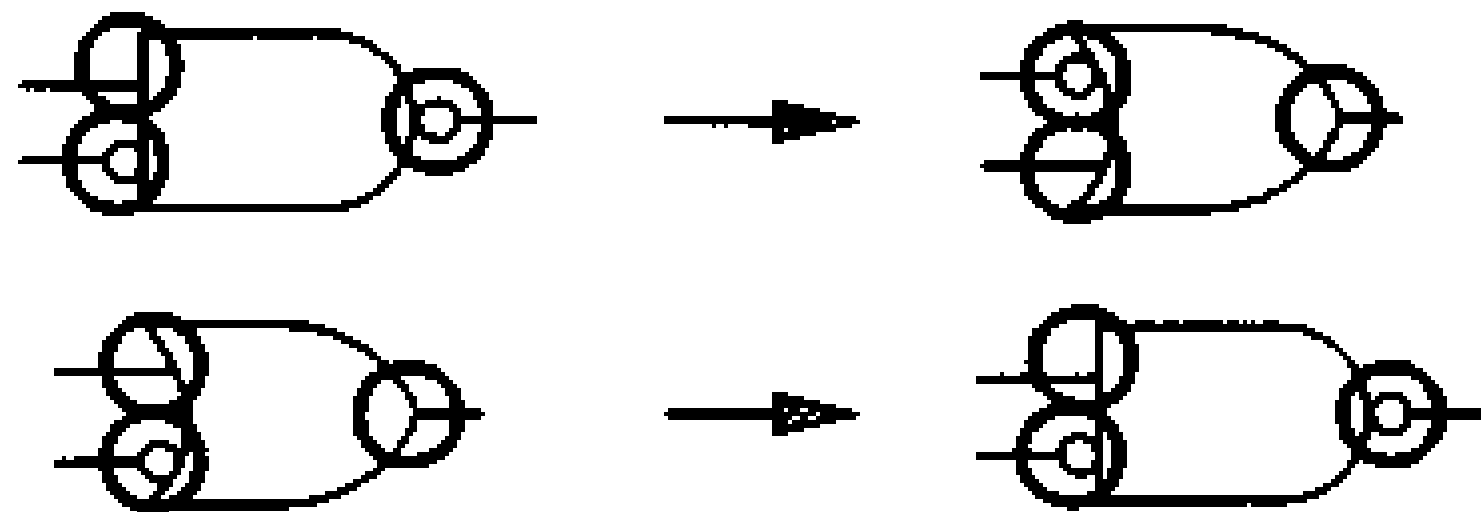


图 4.54 AND 与 OR 逻辑电路的互变

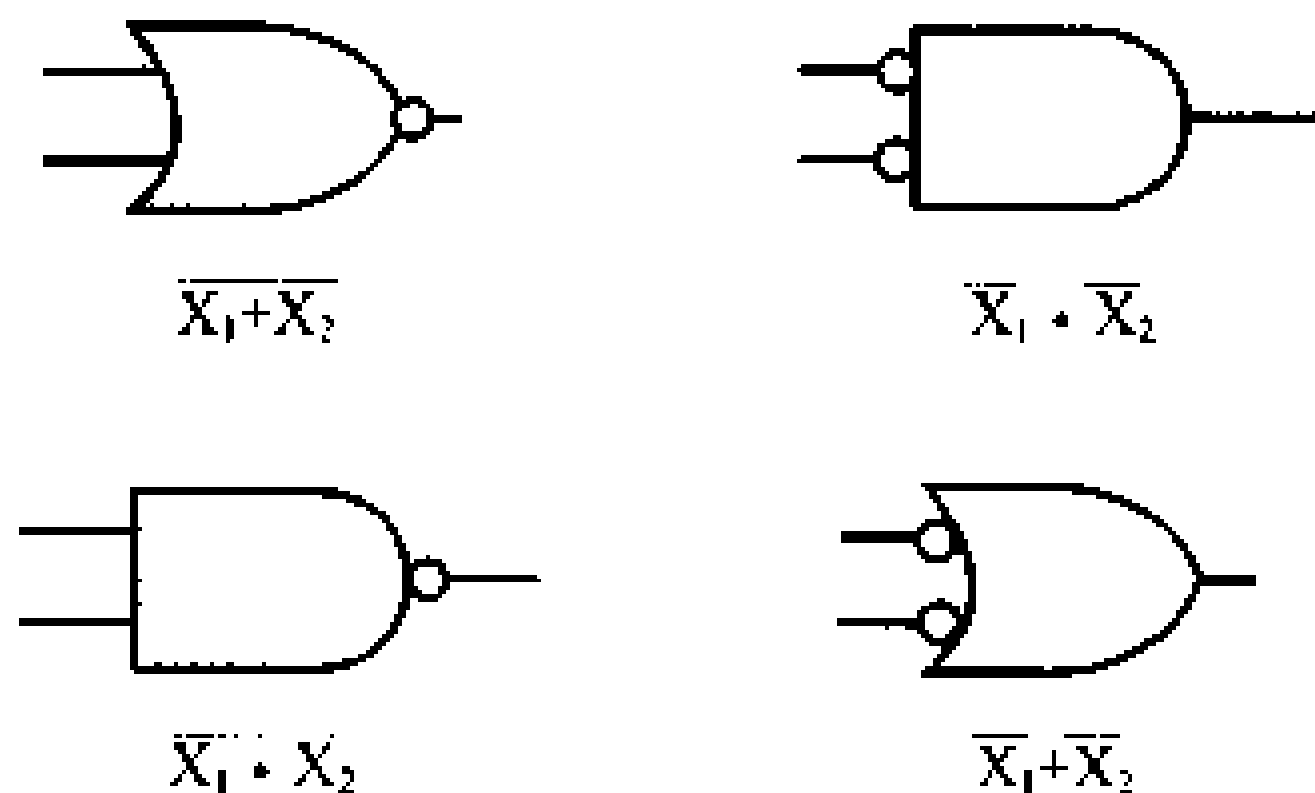


图 4.55 德·摩根定理和 AND 与 OR 的互变

# 16 布尔代数

## □ 要 点

逻辑电路中,将输入看作变量,输出看作变量的函数,AND 电路作为“ $\cdot$ ”,OR 电路作为“ $+$ ”,NOT 电路以及圆圈标记换写成“ $-$ ”,就可以用数学式子来表述逻辑电路的运算。这种数学就叫做布尔代数。

应用布尔代数的定律、以及以图表方式表示逻辑电路的文氏图和卡诺图,可以非常容易地进行公式的简化及证明。

## □ 解 释

逻辑值

## 释 ● 布尔代数

布尔代数,是仅仅处理“真”和“假”这些逻辑值的代数学。在布尔代数中,真和假用逻辑电路的 1 和 0 表示,逻辑积、逻辑和、逻辑非的运算分别对应逻辑电路的 AND、OR、NOT 电路。这样,所有的逻辑电路都可以用称为逻辑式的数式来表达。图 4.56 给出了用逻辑式表示逻辑电路的例子。

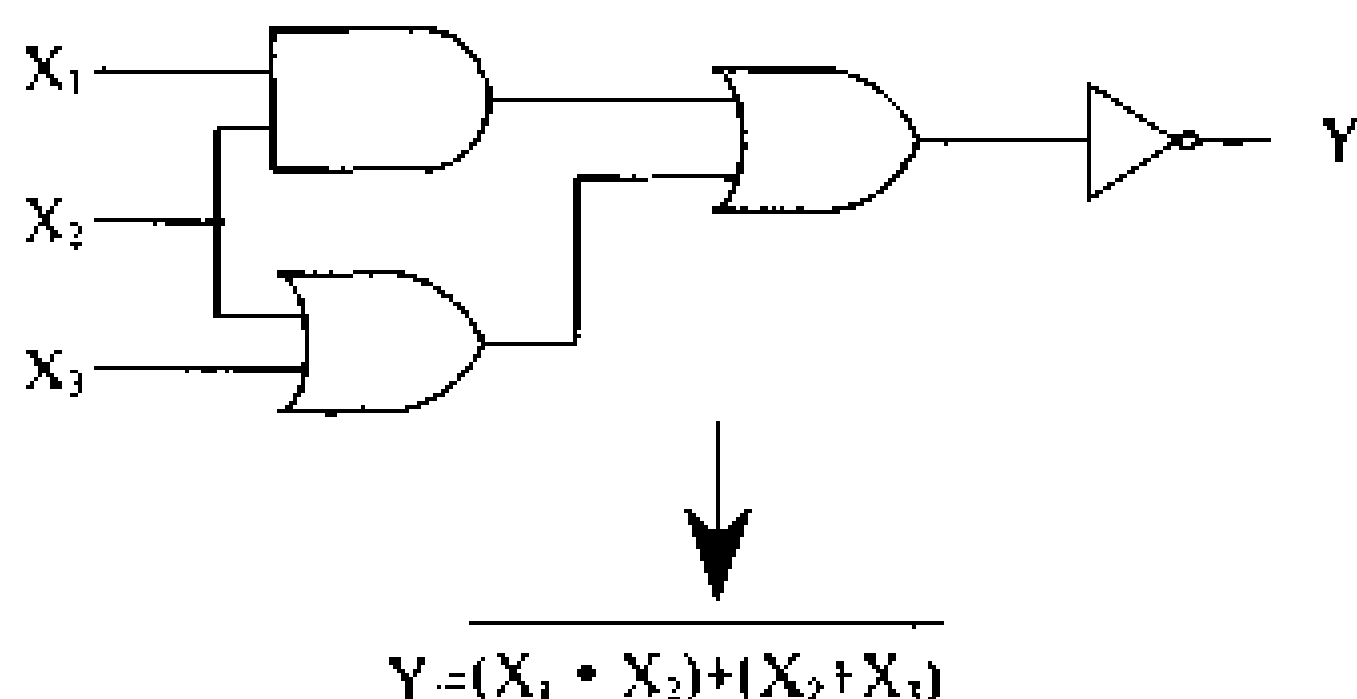


图 4.56 用布尔代数将逻辑电路写成数式

逻辑电路的输入对应布尔代数的变量,这种变量特称为逻辑变量,逻辑变量  $X$  的取值为 1 或 0。逻辑电路的输出对应布尔代数的函数,该函数特称为逻辑函数,逻辑函数  $Y$  的取值亦为 1 或 0。

基本的逻辑电路对应于逻辑运算符。

## 逻辑积

AND 电路相当于布尔代数中的逻辑积。逻辑变量  $X_1$ 、 $X_2$  的逻辑积表示为

$$Y = X_1 \cdot X_2 \text{ 或 } Y = X_1 X_2 \quad (4.11)$$

逻辑积与 AND 电路的含义一样,只有当用符号“ $\cdot$ ”连起来的逻辑变量全为 1 时,函数  $Y$  才为 1。

## 逻辑和

OR 电路相当于布尔代数中的逻辑和。逻辑变量  $X_1$ 、 $X_2$  的逻

辑和表示为:

$$Y = X_1 + X_2 \quad (4.12)$$

逻辑和与 OR 电路的含义一样,用符号“+”连起来的逻辑变量中,无论哪一个为 1 时,函数 Y 即为 1。

### 逻辑非

NOT 电路与布尔代数中的逻辑非相对应。逻辑变量 X 的逻辑非表示为:

$$Y = \bar{X} \quad (4.13)$$

逻辑非与 NOT 电路的含义一样,它表示对符号“-”下的逻辑变量(或逻辑式)的否定。

有了上述这些布尔代数的逻辑变量、逻辑函数以及逻辑运算符号,就可以用逻辑式子来描述逻辑电路。

### ● 布尔代数的定律

布尔代数具有表 4.7 所示的定律。这些定律对于逻辑式的变换以及化简都是非常必要的。

表 4.7 布尔代数的定律

(1) $\overline{\bar{X}} = X$	(2) $X + \bar{X} = 1$ $X \cdot \bar{X} = 0$
(3) $X + X = X$ $X \cdot X = X$	(4) $X_1 + X_2 = X_2 + X_1$ $X_1 \cdot X_2 = X_2 \cdot X_1$
(5) $X_1 + 1 = 1$ $X_1 + 0 = X_1$ $X_1 \cdot 1 = X_1$ $X_1 \cdot 0 = 0$	
(6) $(X_1 \cdot X_2) \cdot X_3 = X_1 \cdot (X_2 \cdot X_3)$ $(X_1 + X_2) + X_3 = X_1 + (X_2 + X_3)$	
(7) $X_1 + X_2 \cdot X_3 = (X_1 + X_2) \cdot (X_1 + X_3)$ $X_1 \cdot (X_2 + X_3) = X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3$	
(8) $X_1 + X_2 \cdot X_3 = X_1 + X_2 \cdot (X_1 + X_3) = X_1$	
(9) $\overline{X_1 + X_2} = \bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2$ $\overline{X_1 \cdot X_2} = \bar{X}_1 + \bar{X}_2$	

### 德·摩根定理

表中的(9)式特称为德·摩根定理,用于逻辑积与逻辑和间的相互变换。

### ● 文氏图

### 文氏图

文氏图以图形方式来表示逻辑式,可以直观地理解逻辑式的内容。

文氏图的表述方法如图 4.57 所示,方框中按逻辑变量的个数画圆,圆中分别写上逻辑变量的名字。画的时候要注意圆间要有交叠。

文氏图各部分的意义如下: $X_1$  是圆内的全部, $\bar{X}_1$  是圆外的全部, $X_1 + X_2$  是包括交叠部分在内的  $X_1$  和  $X_2$  两圆内部的全部, $X_1 \cdot X_2$  则是  $X_1$  和  $X_2$  两圆交叠的部分(参见图 4.58)。作为其应

用的实例,如用来证明布尔代数中的德·摩根定理,如图 4.59 所示,问题将变得非常简单。

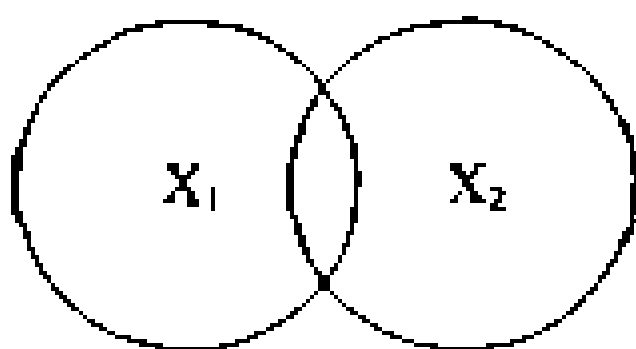


图 4.57 文氏图

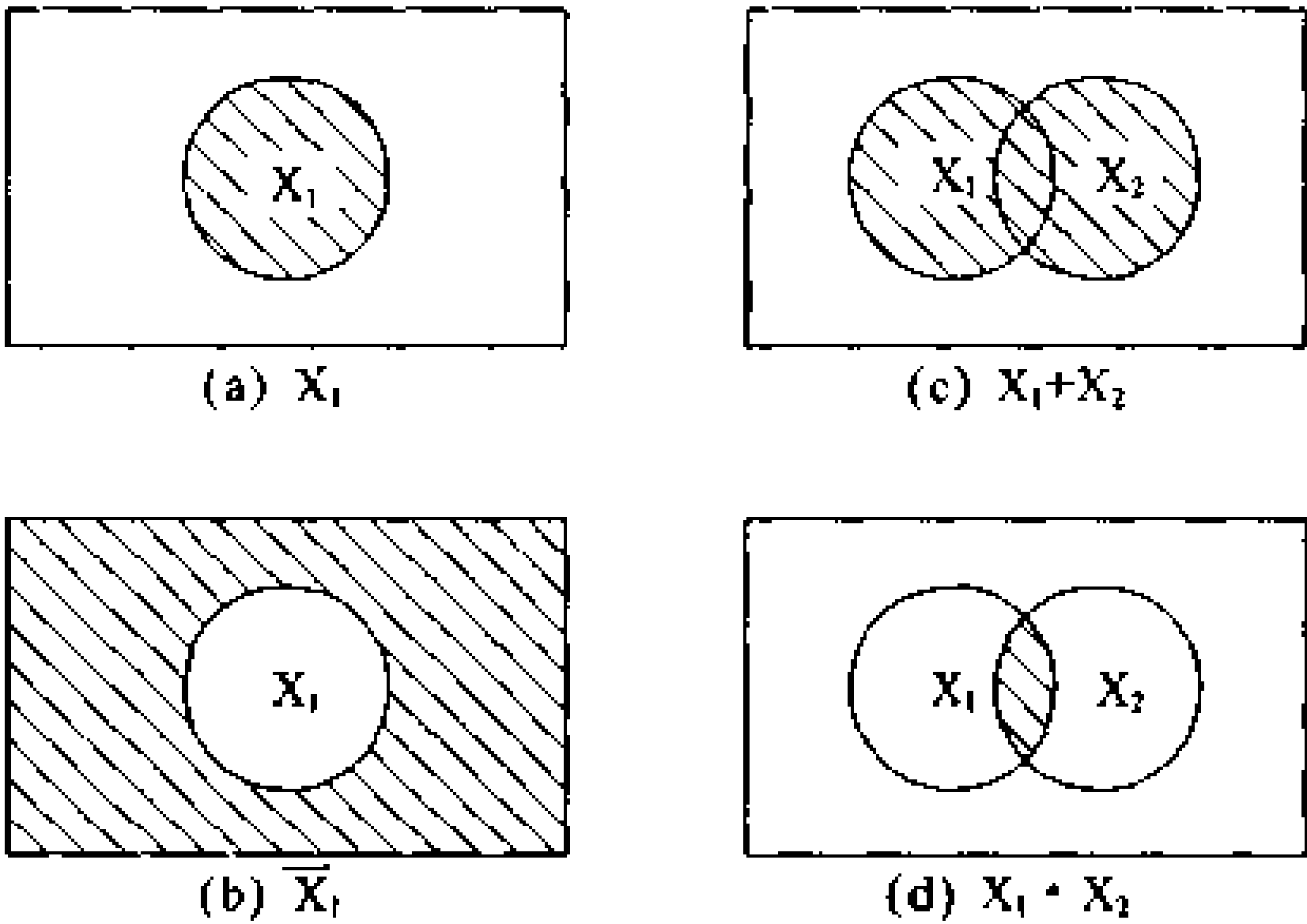


图 4.58 文氏图各部分的意义

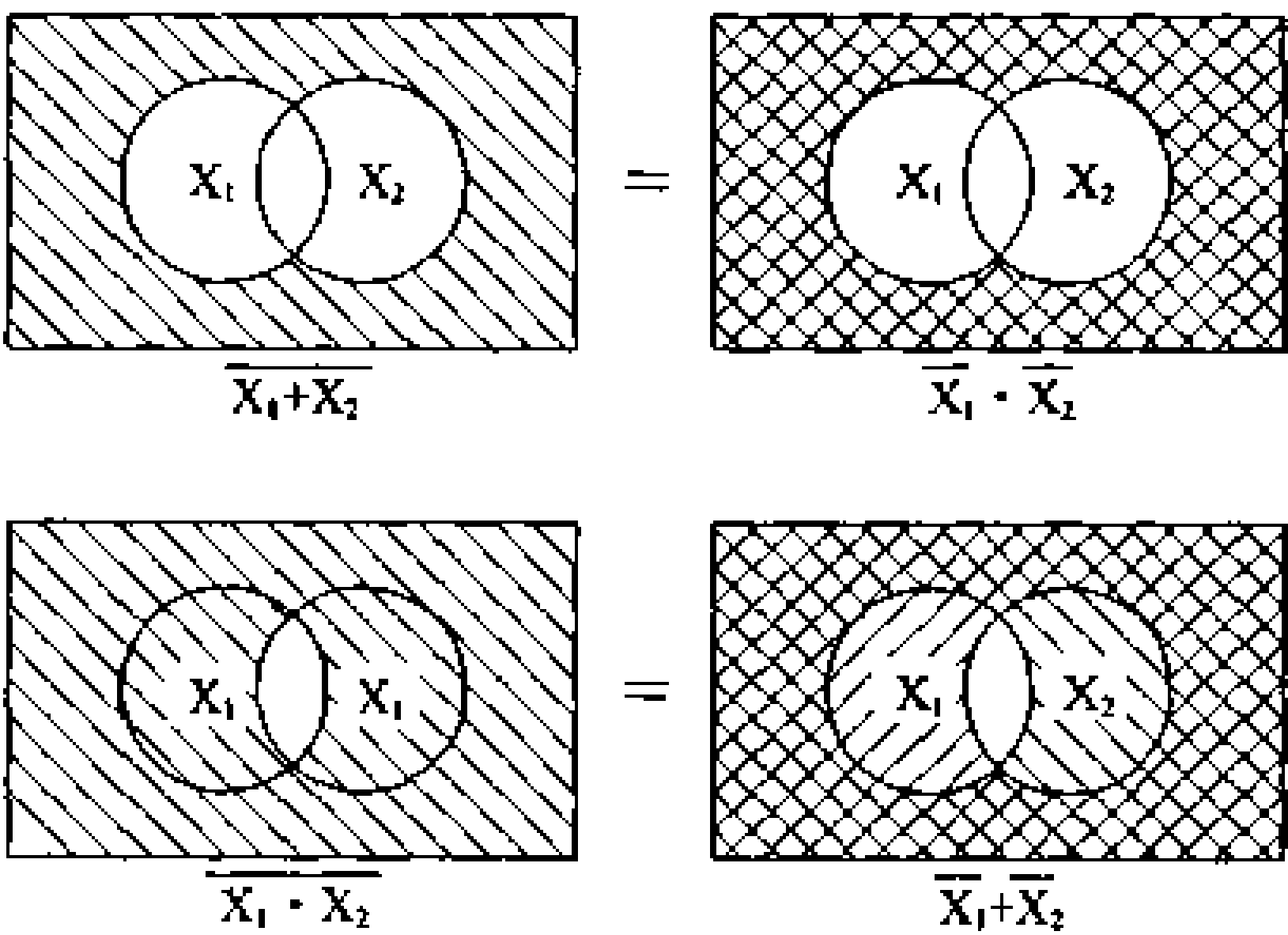


图 4.59 用文氏图证明德·摩根定理

### ● 卡诺图

卡诺图用于对冗长的逻辑式进行化简。

4 变量的卡诺图如图 4.60 所示。图中各格中填入相应的逻辑式， $X_1X_2$  及  $X_3X_4$  各栏中给出以  $X_1$  为 1、以  $\bar{X}_1$  为 0 的所有组合。注意这时  $X_3X_4$  及各栏中，必须是 00 → 01 → 11 → 10 这样的顺序。书写时一定要注意，无论是哪一个逻辑变量由 0 变为 1 或由 1 变为 0，其它的变量都应保持不变。

$X_1X_2 \backslash X_3X_4$	00	01	11	10	
00	$\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3\bar{X}_4$	$\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3X_4$	$X_1\bar{X}_2\bar{X}_3\bar{X}_4$	$X_1\bar{X}_2\bar{X}_3X_4$	← ①
01	$\bar{X}_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4$	$\bar{X}_1\bar{X}_2X_3X_4$	$X_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4$	$X_1\bar{X}_2X_3X_4$	
11	$X_1\bar{X}_2\bar{X}_3\bar{X}_4$	$X_1\bar{X}_2\bar{X}_3X_4$	$X_1X_2\bar{X}_3\bar{X}_4$	$X_1X_2\bar{X}_3X_4$	
10	$X_1\bar{X}_2X_3\bar{X}_4$	$X_1\bar{X}_2X_3X_4$	$X_1X_2X_3\bar{X}_4$	$X_1X_2X_3X_4$	← ②
	↑ ③			↑ ④	

图 4.60 卡诺图

这里举例说明卡诺图的使用方法。将下面的逻辑式化简：

$$Y = \bar{X}_1\bar{X}_3\bar{X}_4 + X_1X_2\bar{X}_3\bar{X}_4 + X_1\bar{X}_2\bar{X}_3\bar{X}_4 + \bar{X}_1X_2X_3\bar{X}_4 \\ + X_1X_2X_3X_4$$

因为式子的第 1 项不含  $X_2$ ，所以首先要用定律 (2)、(5)、(7) 将其变为含有  $X_2$  的形式：

$$\bar{X}_1\bar{X}_3\bar{X}_4 = \bar{X}_11\bar{X}_3\bar{X}_4 = \bar{X}_1(X_2 + \bar{X}_2)\bar{X}_3\bar{X}_4 \\ = \bar{X}_1X_2\bar{X}_3\bar{X}_4 + \bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3\bar{X}_4$$

则原式变为：

$$Y = \bar{X}_1X_2\bar{X}_3\bar{X}_4 + \bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3\bar{X}_4 + X_1X_2\bar{X}_3\bar{X}_4 \\ + X_1\bar{X}_2\bar{X}_3\bar{X}_4 + \bar{X}_1X_2X_3\bar{X}_4 + X_1X_2X_3X_4$$

这样一来，所有各项都用全体逻辑变量的积来表示，而以这些项的逻辑和所表述的式子则称为范式。

再如图 4.61 所示，在卡诺图中与该逻辑式的各项相对应的格子中写入“1”。然后将这些写有“1”的格子成组(2 格、4 格、…为一组，即 2<sup>n</sup> 格为一组)地用尽可能大的四边形围起来。此时应注意图中的①和②、③和④应理解为是邻接的。画出的四边形相互重叠也无妨，反正在框内即可。图 4.61 中的(1)和(2)就是四边形围

范式

起来的例子。

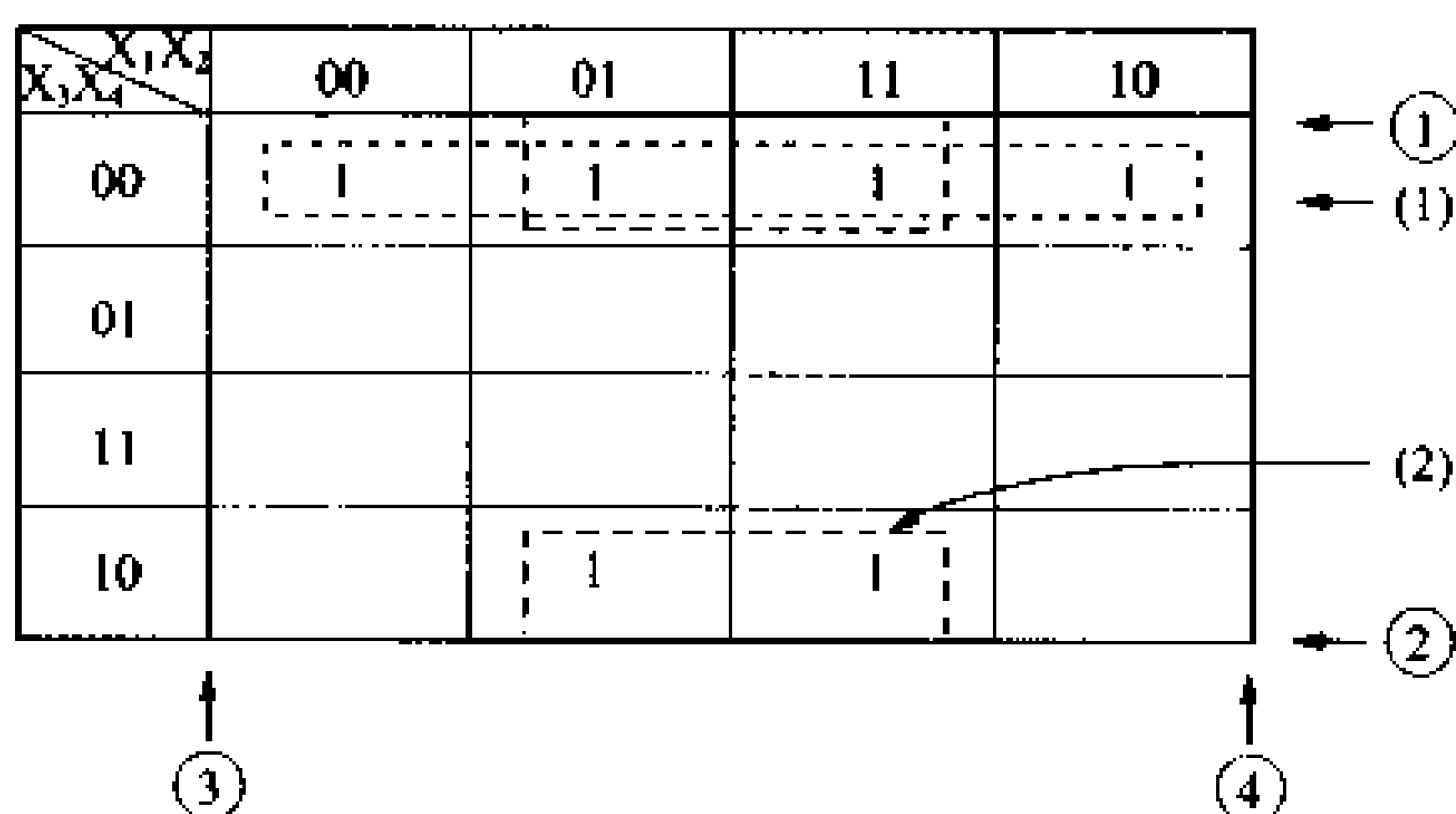


图 4.61 用卡诺图化简逻辑式

在四边形围着的区域内,将同时含有其 0 和 1 的逻辑变量去除,剩余变量以逻辑积形式相连,成为式子的一项。图中四边形(1)中含有  $X_1, X_2$  的 0 和 1,剩下的就是  $\bar{X}_3 \bar{X}_4$ , (2)中含有  $X_1, X_2$  的 0 和 1,剩下的则为  $X_2 \bar{X}_1$ 。将这些剩余项以逻辑和相连,即为化简结果:

$$Y = \bar{X}_3 \bar{X}_4 + X_2 \bar{X}_1$$

与原式相比,结果变得格外简单。而且,由于逻辑积、逻辑和、逻辑非已经变得很少,逻辑电路自身也简单了。可见,使用卡诺图,远比使用布尔代数定律更易简化逻辑式,同时带来逻辑电路的简化。

## 例 题

不改变式子的性质而将  $\overline{X_1 \cdot \bar{X}_2}$  中的“ $\cdot$ ”号变为“ $+$ ”号,将  $X_1 + \bar{X}_2$  中的“ $+$ ”号变为“ $\cdot$ ”号。

**解说** 无论是将“ $\cdot$ ”号变为“ $+$ ”号,还是将“ $+$ ”号变为“ $\cdot$ ”号,都应使用表 4.7(9)的德·摩根定理,则

$$\overline{X_1 \cdot \bar{X}_2} = \bar{X}_1 + \bar{\bar{X}_2} = \bar{X}_1 + X_2$$

$$X_1 + \bar{X}_2 = \overline{\overline{X_1 + \bar{X}_2}} = \overline{\bar{X}_1 \cdot \bar{\bar{X}_2}} = \overline{\bar{X}_1 \cdot X_2}$$

**答**  $\overline{X_1 \cdot \bar{X}_2} = \bar{X}_1 + X_2, X_1 + \bar{X}_2 = \overline{\bar{X}_1 \cdot X_2}$   
(参见图 4.54)



# 17 NAND 电路和 NOR 电路

**要 点** {AND/OR} + NOT = {NAND/NOR}

基本的逻辑电路当然是 AND(与)、OR(或)以及 NOT(非)。另外,也有一些使用频度很高的属于基本逻辑电路组合的逻辑电路,其中最具代表性的是 NAND(与非)电路和 NOR(或非)电路。

**解 释** ● NAND 电路和 NOR 电路

反相器

NAND 电路

在 AND 电路后接一个 NOT 电路(反相器),即成为 NAND 电路。若要用逻辑符号说明,则如图 4.62(a)所示,输入  $X_1$  和  $X_2$  相与,即  $X_1 \cdot X_2$ ,然后经 NOT 电路反相后输出。这时,作为输出的布尔代数表示,要在输出的符号上添加一横杠,写成  $\overline{X_1 \cdot X_2}$ ,读作  $X_1$  AND  $X_2$  bar,此即 NAND(not-AND)。

NAND 电路的常用逻辑符号,如图 4.62(b)所示,是将图 4.62(a)简化,在其 AND 符号的输出侧画一个小圆圈来表示。图 4.62(c)是表示其输入输出关系的真值表,可见,输出是输入  $X_1$ 、 $X_2$  相与的非。

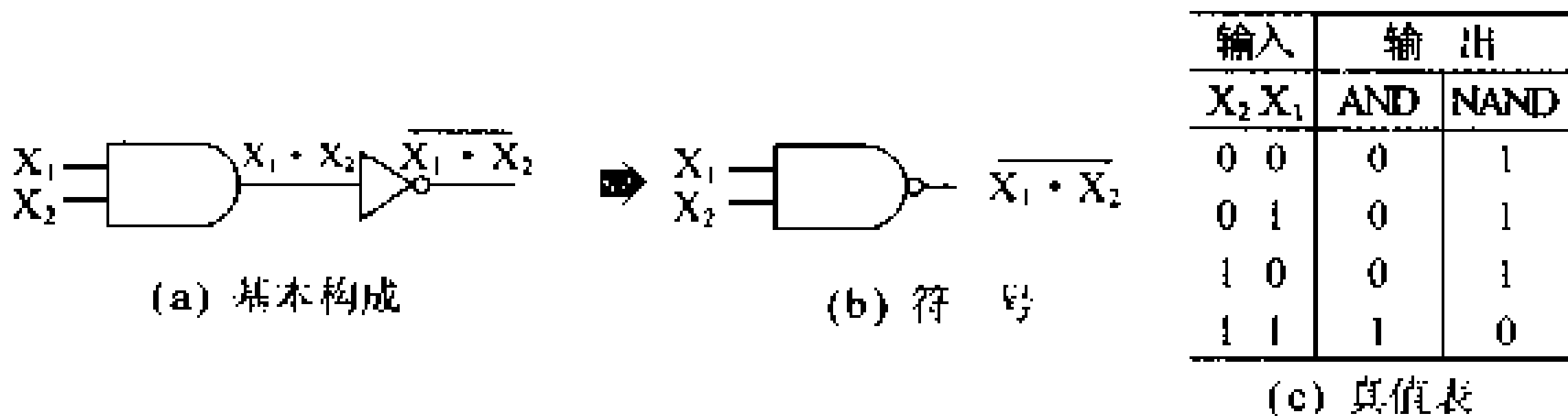


图 4.62 NAND 电路

NOR 电路

在 OR 电路后接一个 NOT 电路,即成为 NOR 电路。如图 4.63(a)所示,输入为  $X_1 + X_2$ ,经 NOT 电路反相后输出。输出的布尔代数表示为  $\overline{X_1 + X_2}$ ,因为是对或的否定(not-OR),因而称为 NOR。

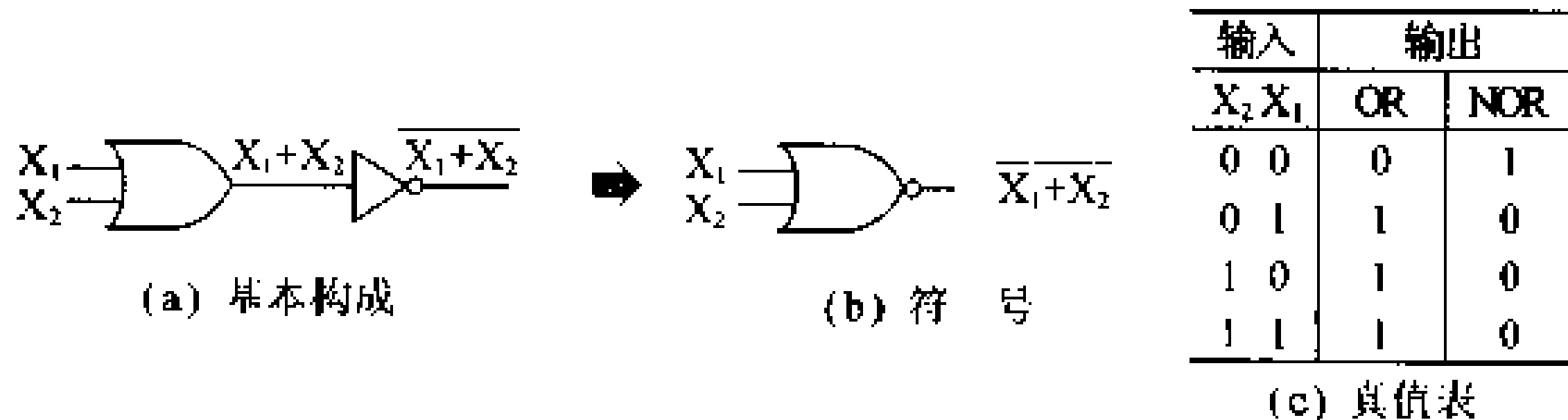


图 4.63 NOR 电路

其常用的逻辑符号,如图 4.63(b)所示,用 OR 电路符号的输出侧加小圆圈表示。图 4.63(c)是其真值表。

## □ 相关知识 ● NAND 的活用

NAND 和 NOR 的机能,数字电路中用得非常多。这是因为仅用 NAND 就可以构成 NOT、AND 以及 OR。图 4.64 是其构成的实例。正因为如此,通过组合可以很方便地得到其它所需的逻辑电路,因而应用非常广泛。

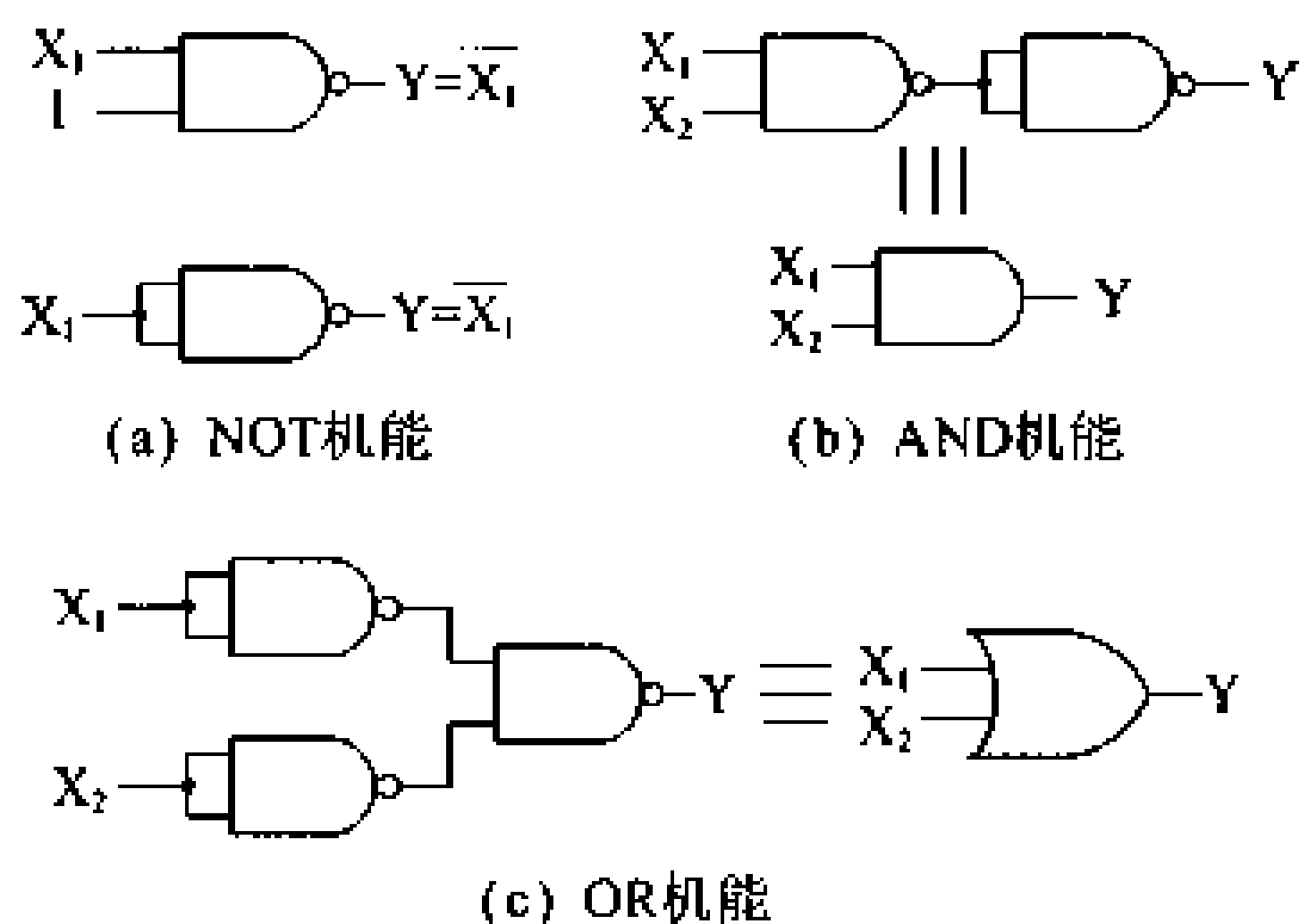


图 4.64 NAND 的活用

## ■ 例 题 4.6.2

将图 4.65 的脉冲信号加于 NAND 电路(图 4.62)和 NOR 电路(图 4.63)的  $X_1$  输入端,而  $X_2$  的输入为 1 和为 0 时,输出脉冲信号如何?

**答** 注意输出随  $X_2$  的输入状态的不同而不同。在 NAND 中,  $X_2 = 0$  时,输出总为 1,而  $X_2 = 1$  时,输出脉冲为 011001。在 NOR 中,  $X_2 = 1$  时,输出总为 0,而  $X_2 = 0$  时,输出脉冲为 011001。

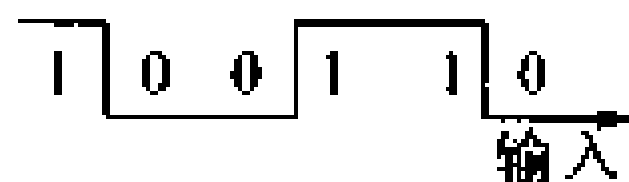


图 4.65 脉冲输入信号

## 18 基本逻辑电路的组合

### □ 要 点

将基本逻辑电路进行组合,可以获得具有某种功能的逻辑电路。典型的组合逻辑电路有多输入门电路、异或电路及同或电路。

### □ 解 释

#### ● 多输入门电路/异或电路/同或电路

##### 多输入门电路

多输入门电路如图 4.66 所示。图 4.66(a)为三输入与门电路。逻辑电路中经常会遇到变量有 3 个的情况。3 个输入为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ ,输出为  $Y$  时,用布尔代数表示可以写成  $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 = Y$ ,其真值表如图 4.66(b)所示,只有输入全为 1 时,输出才为 1。

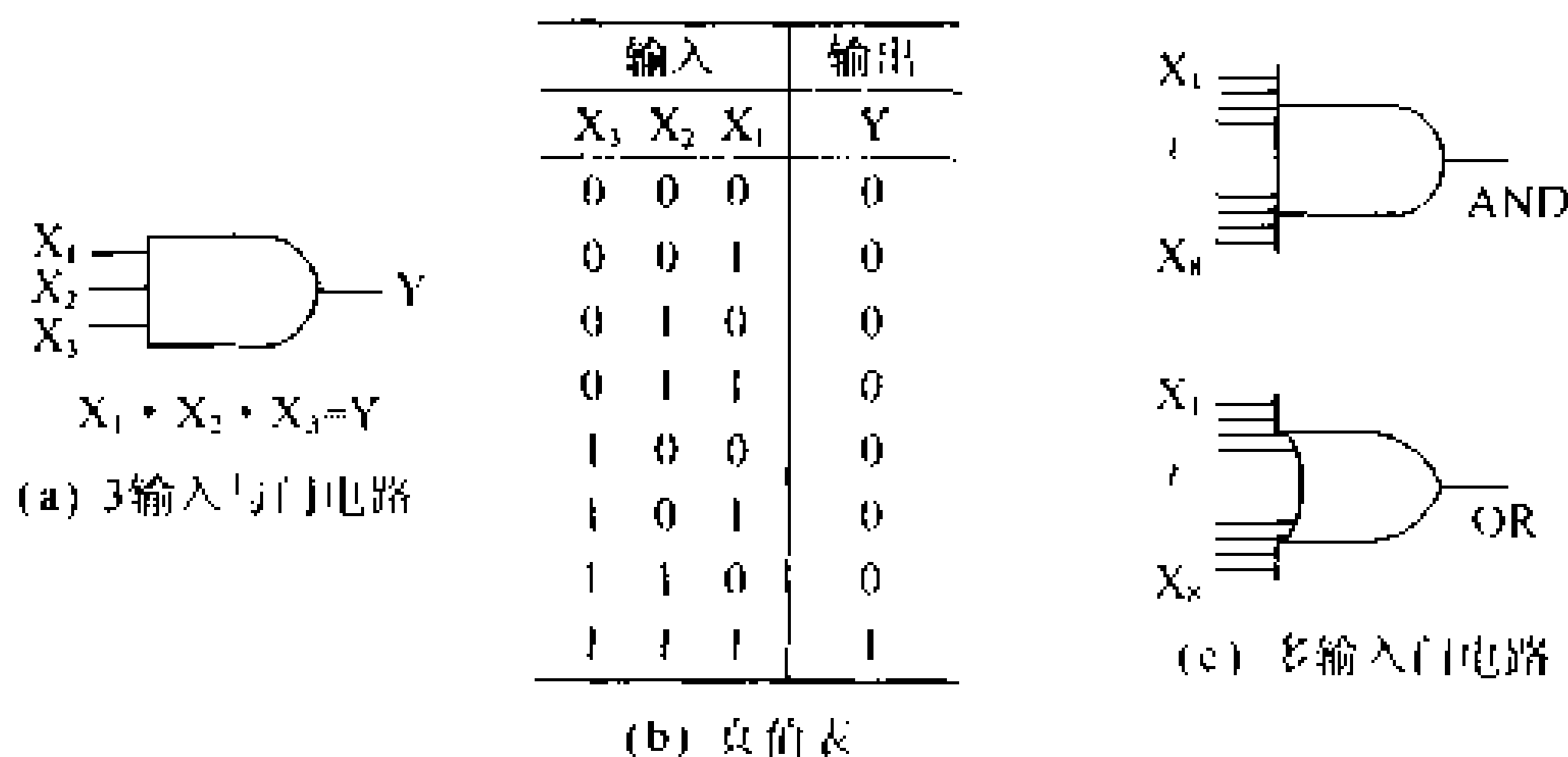


图 4.66 多输入门电路

推而广之,组合逻辑电路可以有图 4.66(c)所示的多输入与门,多输入或门等。与 3 输入一样,多输入与门只有当输入  $X_1 \sim X_n$  全为 1 时输出才为 1。而对于多输入或门,只要输入  $X_1 \sim X_n$  不全为 0,输出都是 1。

##### 异或 XOR 电路

图 4.67(a)的电路称为异或(exclusive OR)电路,一般常简称为 XOR 电路。该电路进行的逻辑运算为  $X_1 \cdot \bar{X}_2 + \bar{X}_1 \cdot X_2 = Y$ ,输入  $X_1$ 、 $X_2$  的状态不一致时输出为 1。图 4.67(b)是其符号图,布尔代数中用符号“ $\oplus$ ”来表示 XOR 功能。

##### 同或电路

图 4.67(c)是输入  $X_1$ 、 $X_2$  的状态一致时输出为 1 的逻辑电路。这种电路称为同或电路,进行的逻辑运算为  $\bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2 + X_1 \cdot X_2 = Y$ 。从图 4.67(c)的真值表可知,该运算是异或的否定。因而其电路也可以在 XOR 电路后接反相器来构成,称之为异或非 XNOR 电路,在布尔代数中的符号如图 4.67(d)所示。

##### XNOR 电路

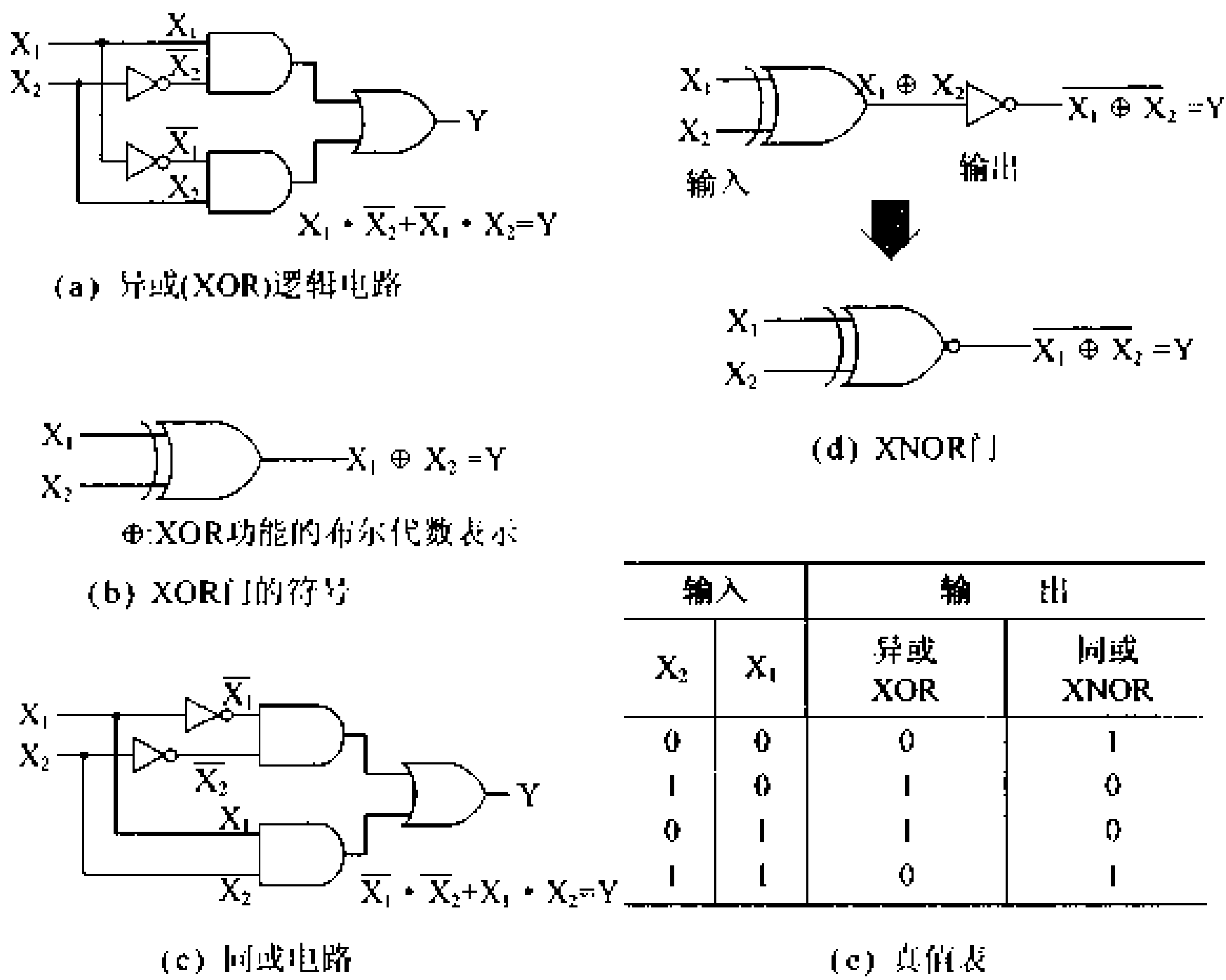


图 4. 67 组合逻辑电路

相关知识 ● 奇偶校验

从图 4. 67(e)的真值表可知,对于 XOR 电路,表中第 2 行和第 3 行信号为 1 的输入有奇数个,这时输出为 1,而表中第 1 行和第 4 行信号为 1 的输入有偶数个,输出为 0。因而,XOR 电路也可以称为奇数校验电路,而 XNOR 电路则是偶数校验电路。

必备知识

XNOR 是一致,XOR 是不一致。

## 19 半加器和全加器

### □ 要点

数字电路的加法,如图 4.68(a)所示,是按二进制运算的。因而就得有图 4.68(b)所示的 4 个运算规则。能够按这些规则运算的组合逻辑电路就是加法器。

### □ 释

半加器

### ● 半加器/全加器

图 4.69 是二进制一位加法电路,称为半加器(half adder)。满足图 4.68(b)4 个运算规则的真值表,可以写成图 4.69(a)的样子。图 4.69(b)是半加器(HA)的方框图,其中输入为  $X_1$ 、 $X_2$ ,输出为和  $S$  及进位  $C_o$ 。

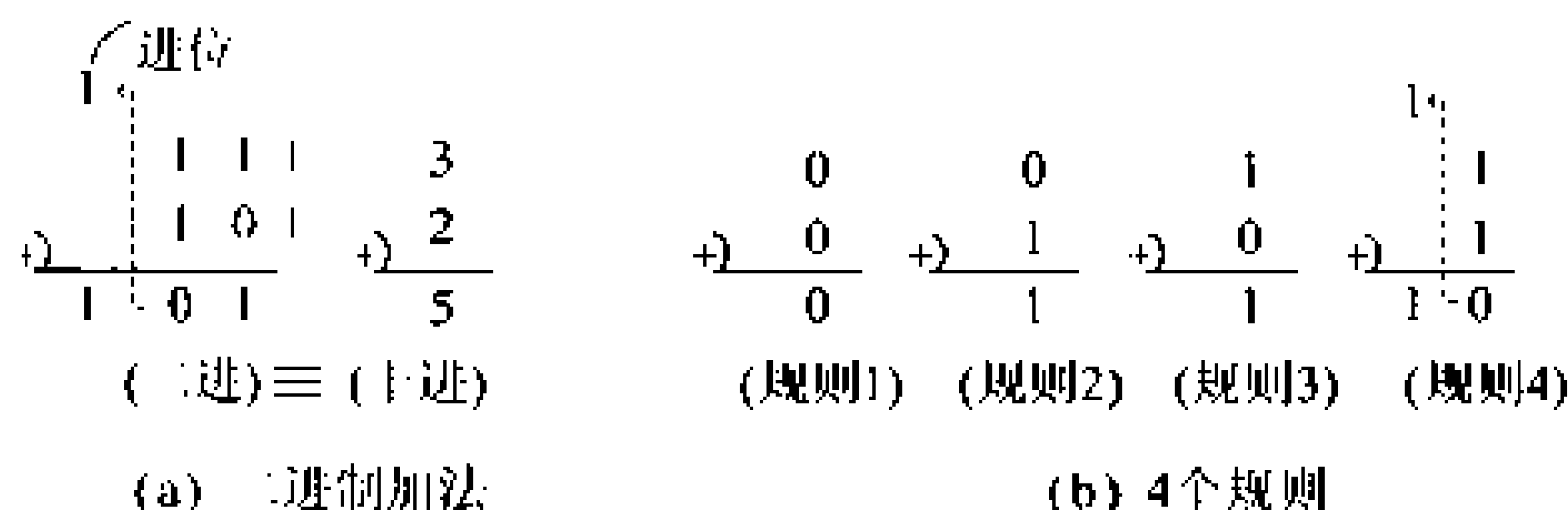
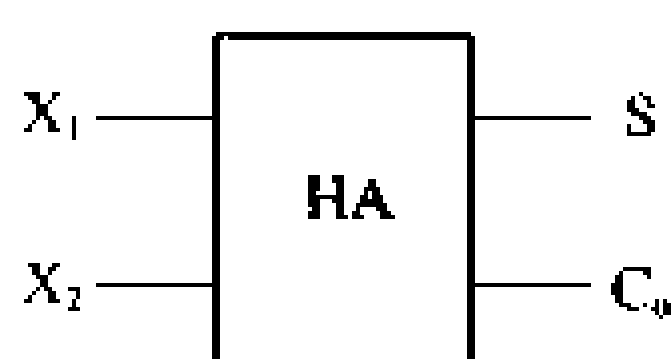


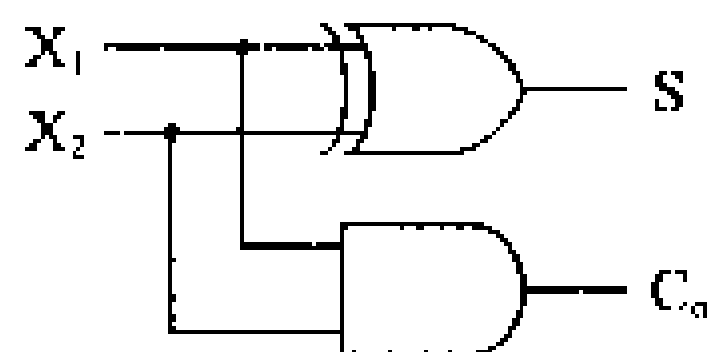
图 4.68 二进制加法及其规则

输入		输出	
$X_2$	$X_1$	和 $S$	进位 $C_o$
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

(a) 真值表



(b) 框图



(c) 逻辑电路图

图 4.69 半加器

从真值表可看出,为满足输出  $S$ ,进行此加法运算的逻辑电路必须具有输入不一致时输出为 1 的 XOR 电路功能。而对于进位  $C_o$ ,则用 AND 电路来实现。可见,半加器的构成如图 4.69(c)所示即可。

下面来看一下图 4.70(a)的二进制加法实例。第 1 位相加产生的进位 1 要加到第 2 位的相加中,变成  $1+1+1$ ,后面也要遇到

全加器

同样的加法。这时，加法运算的输入就是3个。很显然，半加器不能完成这样的运算。为此，就要在图 4.68(b)4 个加法运算规则之上，再增加一个考虑进位项的规则。图 4.70(b)所示的规则就是必须的。能够实现进位加法运算的电路称为全加器(full adder)。

图 4.70(c)给出了表示全加器的方框图。图中  $C_{in}$  为进位输入。在图 4.70(d)中，首先用半加器进行 2 个输入的加法，然后将其和  $S$  与进位输入  $C_{in}$  再用半加器相加以实现进位加法。此时，两个半加器无论哪个的  $C_o$  输出为 1，最后的  $C_o$  输出都应该为 1。这就需要使用 OR 电路。

通常，进行大的二进制数相加时，半加器仅用于第 1 位相加，其它位(2、4、8、16 位等)的相加则要使用带进位输入的全加器。

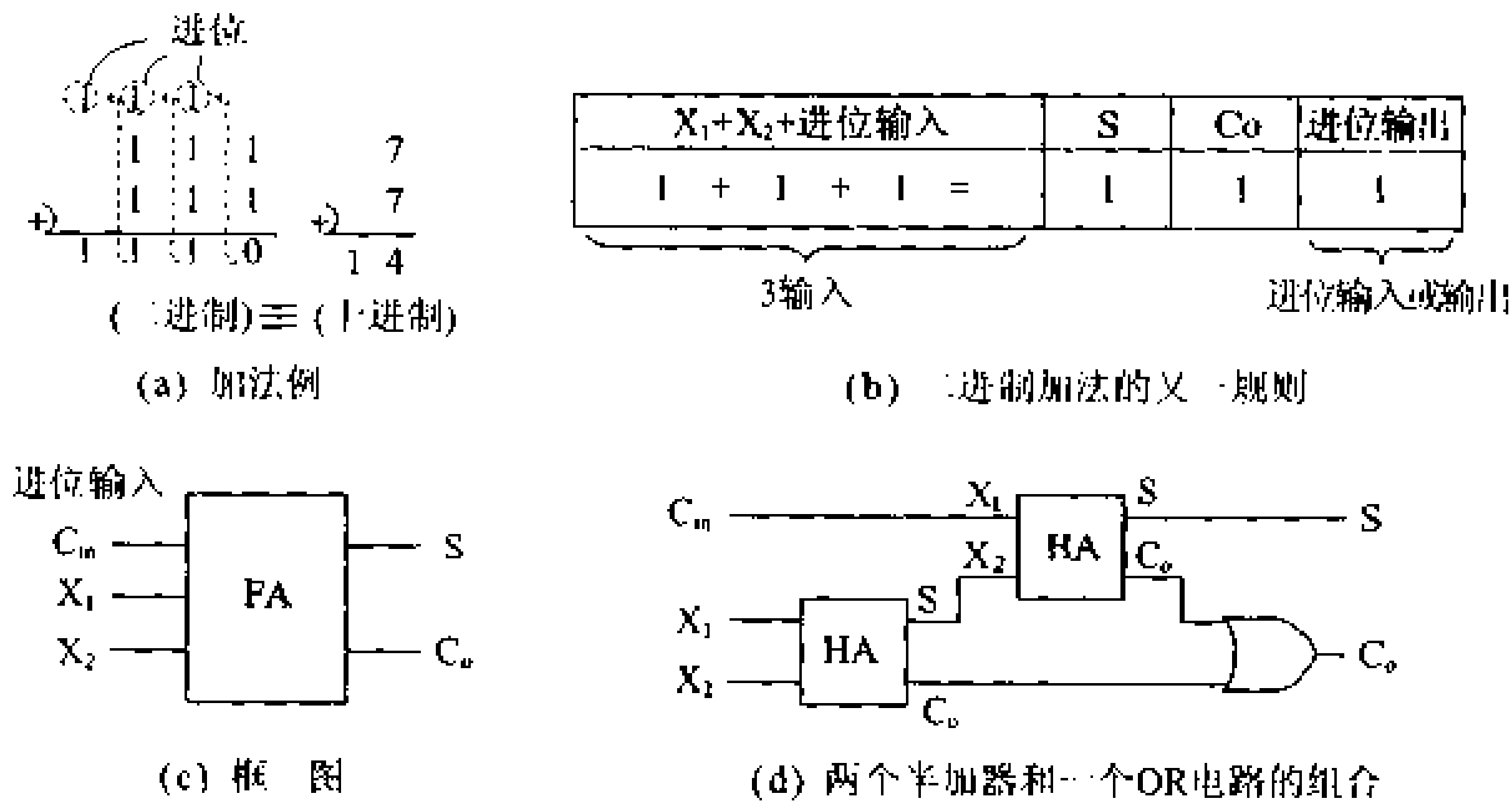


图 4.70 全加器

研究

试用 XOR、AND、OR 电路绘制全加器的逻辑电路。

## 20 编码器和译码器

### □ 要 点

数字电路中因为要用二进制码进行处理,所以由十进制到二进制的变换以及相反由二进制到十进制的变换都是非常重要的,完成这些变换的逻辑电路是编码器和译码器。

### □ 解 释 ● 编码器和译码器

编码器

译码器

图 4.71 的左侧设置有 1~9 九个开关,根据这些开关的通(ON)断(OFF)可以输入十进制码。而要进行数字处理时,首先就必须将这些输入由十进制码变为二进制码。实现这一二进制码变换的逻辑电路称为编码器(encoder)。二进制码经图中的后续逻辑电路处理,输出时,还必须由二进制再变换到十进制。实现这一向十进制码变换的逻辑电路称为译码器(decoder)。译码器十进制化了的信号经 LED 显示,给出处理结果。

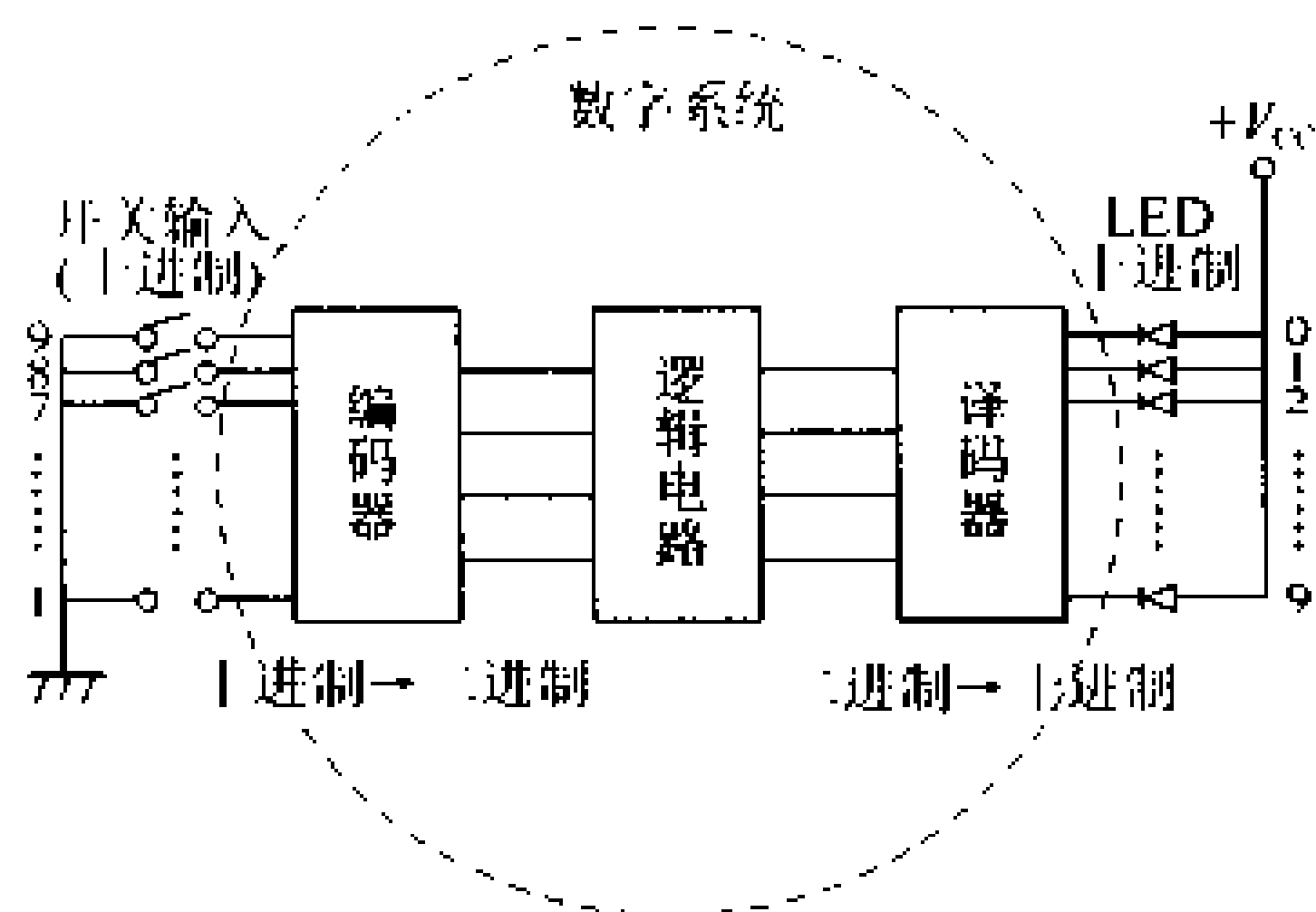


图 4.71 数字处理系统构成例

编码器的构成可用图 4.72 所示的 OR 电路的组合来实现。输入为图 4.71 所示的 1~9,二进制换算时总共需要  $2^0$  位,输出则为  $2^0$ (二进制 1 位)、 $2^1$ (二进制 2 位)、 $2^2$ (二进制 4 位)和  $2^3$ (二进制 8 位)四个。例如,开关 6 输入时, $2^1$  位和  $2^2$  位的输出应为 1,而  $2^0$  和  $2^3$  位的输出为 0,则总输出为二进制的 6—0110。

译码器的构成可用图 4.73 所示的 NOT 电路和 AND 电路的组合来实现。与编码器相反,输入为二进制表述的  $2^0$ 、 $2^1$ 、 $2^2$ 、 $2^3$  各位的状态,输出则要以十进制来表述,因而总共需要 0~9 十个输出。AND 电路输入侧的小圆圈是 NOT 电路的简单表示,意思是

反相后再输入 AND 电路。与前面的例子相反,现在来看看二进制 0110 的输入。 $2^0$  和  $2^1$  位反相后输入为 1,  $2^2$  和  $2^3$  位原封不动输入 1, AND 电路的功能是输入全为 1 时输出为 1, 可见, AND 电路 6 的输出为 1。

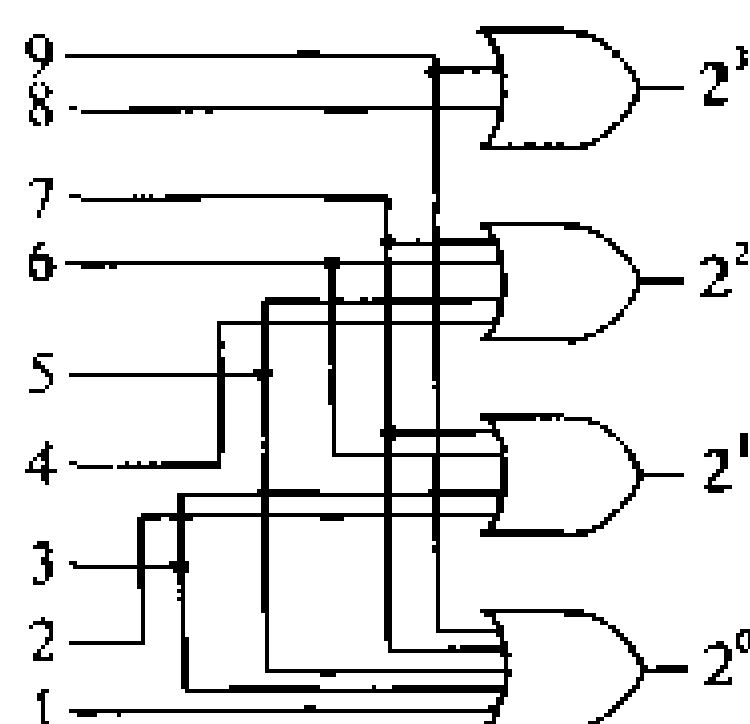


图 4.72 编码器

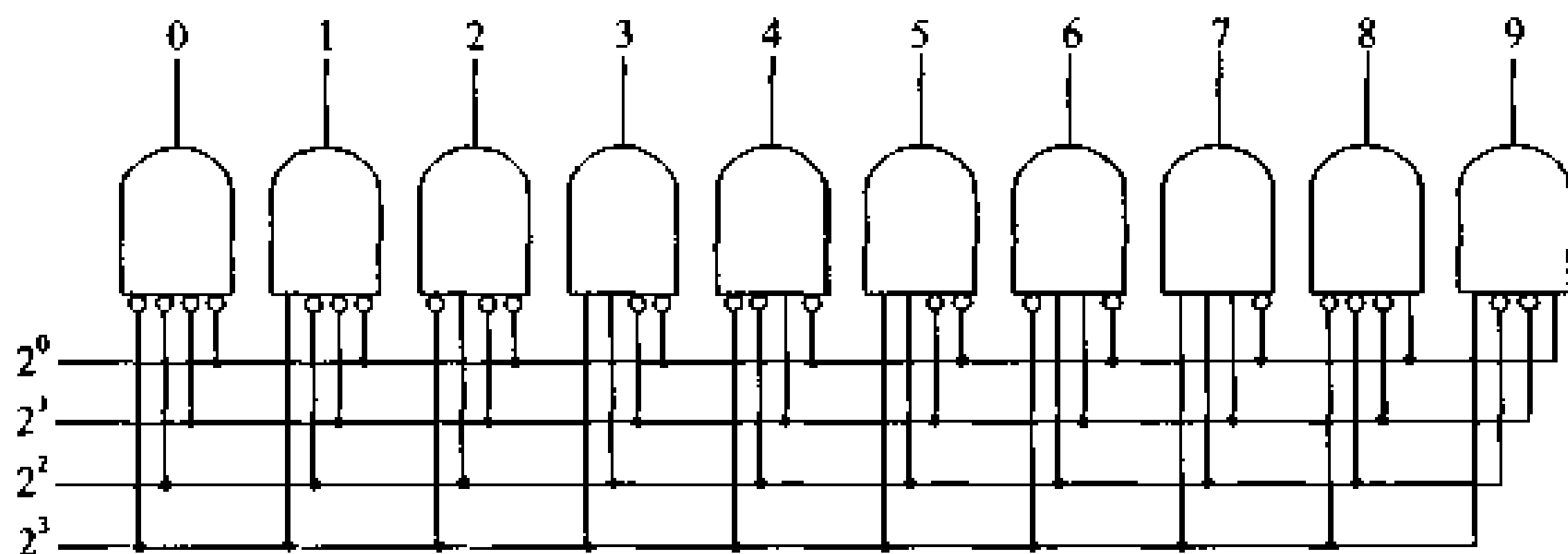


图 4.73 译码器

## 研究

图 4.72 的编码器中, 分别输入 1、5、7 时, 试确认其输出如何?



## 21 触发器

□ 要 点

具有记忆保持功能的逻辑电路称为时序逻辑电路。时序逻辑电路是由称为触发器 (Flip flop) 的电路构成的。RS 触发器以及 JK 触发器都是最基本的时序逻辑电路。

□ 解 释

● RS 触发器和 JK 触发器

RS-FF

触发器 (以下简称为 FF) 中, 最基本的是 RS-FF。其逻辑符号如图 4.74(a) 所示, 图 4.74(b) 是显示其功能的真值表。输入端由表示置位的 S 和表示复位的 R 组成, 输出有 Q 及  $\overline{Q}$  (Q 的否定) 端子。

保持

由真值表可知, 输出 Q、 $\overline{Q}$  保持 R、S 变化前的状态, 输入 S 为 1、R 为 0 时输出 Q 送出 1、 $\overline{Q}$  送出 Q 的否定 0。其结果 FF 记着 1, 该状态称为置位状态。相反, 输入 S 为 0、R 为 1 时, 输出 Q 送出 0、 $\overline{Q}$  送出 1, FF 记着 0, 这称为复位状态。

置位状态  
复位状态

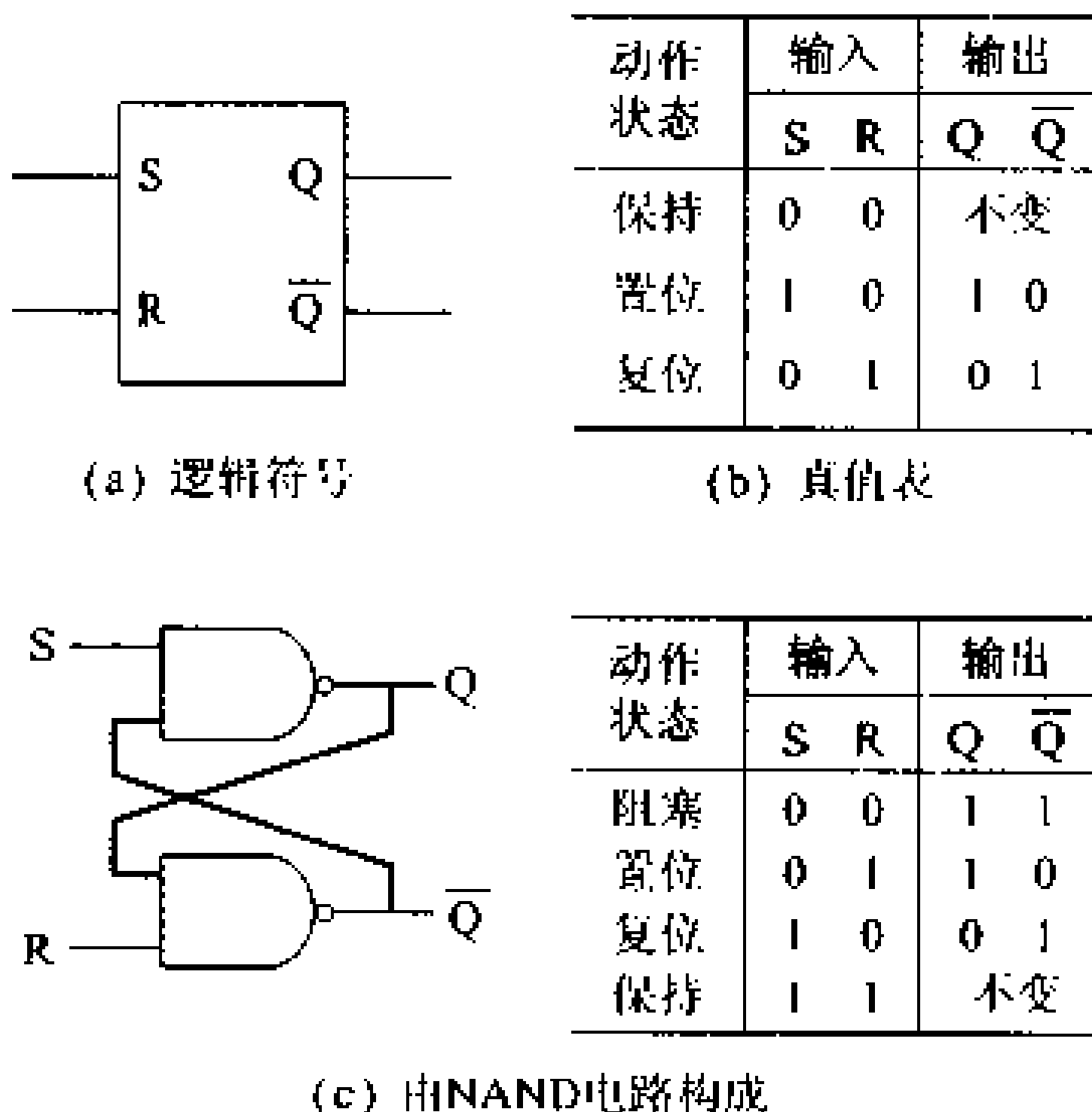


图 4.74 RS-FF

反馈

实现此触发动作的电路, 可用将反馈引入 NAND 或 OR 电路的反馈来实现。图 4.74(c) 给出了由 NAND 电路构成的 FF。分析其动作时要注意, 图中粗线表示反馈。

现在, 把各电路设为 NAND1、NAND2, 设初始状态 R、S 均为 1, Q 为 0,  $\overline{Q}$  为 1。当 S 变为 0 时, NAND1 的输入为 0 和反馈来的

1,输出为 1,该输出反馈给 NAND2,NAND2 这时的输入就是 1 和 1,其输出为 0。如果 R 为 0、S 为 1 时,同样的过程得到的结果相反。

通过这种仔细的动作分析,即可明白真值表所表示的结果。而且也明白输入全为 0 时输出全为 1。这种状态称为阻塞状态,FF 工作中不能这样输入。

RS-FF 中输入 R、S 同时为 0 时 FF 成为阻塞状态。为克服此缺点,可以使用 JK-FF。JK-FF 的逻辑符号如图 4.75(a)所示,JK-FF 有 3 个输入端,J 和 K 是数据输入端,CK 称为时钟输入端。时钟输入是为了与外部电路保持同步的脉冲输入。JK-FF 与 RS-FF 一个很大的不同是:只有 CK 的输入变化时 FF 的状态才会改变。CK 端的三角标记意味图 4.75(c)所示的是边缘触发,小圆圈则意味是时钟脉冲的下降沿触发。J、K 的输入经时钟信号 CK 同步后传送到输出。输出端与 RS-FF 一样,有 Q 端和  $\bar{Q}$  端,如图 4.75(b)的真值表所示,随着 J、K 输入的不同,其输出有保持、复位、置位等状态。然而,当 J、K 都为 1 时,每输入一个时钟脉冲,输出都要翻转一次。这一点与 RS-FF 区别很大。使用 JK-FF 可以构成很多别的 FF,因而也将 JK-FF 称为万能 FF。

阻塞状态

JK-FF

CK 时钟输入端

边缘触发

翻转

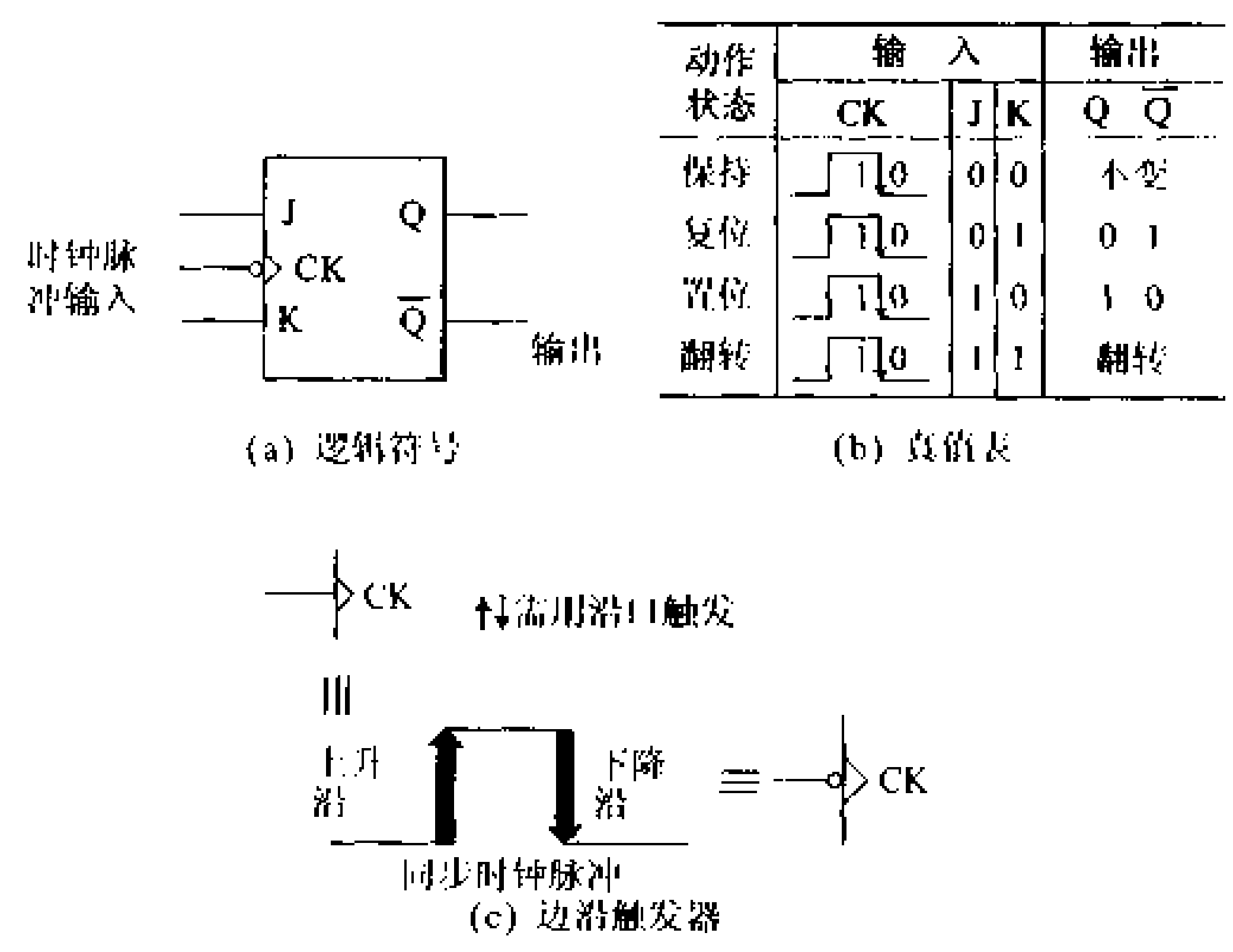


图 4.75 JK-FF

**□ 相关知识** ● T-FF 和 D-FF

触发器的种类很多。图 4.76 给出了 T-FF 和 D-FF。T-FF

是靠上下沿翻转的, D-FF 具有暂存数据、等待下一个脉冲到来时再输出的延时功能。

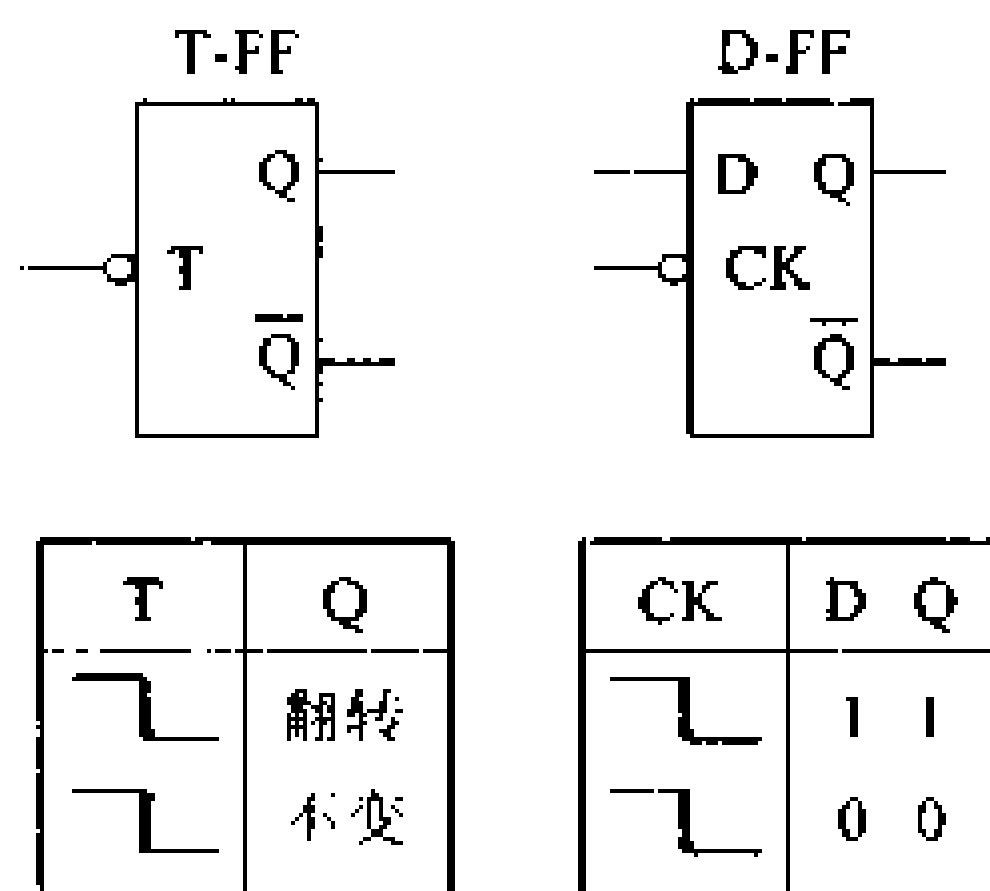


图 4.76 T-FF、D-FF

### 例 题

将适当的词语填入下面句子的( )中。

逻辑电路大体上可以分为(a)逻辑电路和(b)逻辑电路,后者具有(c)功能,是由(d)电路构成的。

**答** a:组合, b:时序, c:记忆, d:FF

### 必备知识

JK-FF 是每来一个时钟脉冲翻转一次。

# 22 寄存器

□ 要 点

一个 FF 可以记忆二进制 1 位(1 比特)数据,所以,如果使用  $n$  个 FF,就可以记忆  $n$  比特的数据。能够记忆整个数据的电路称为寄存器(register)。

□ 解 释 ● 移位寄存器

寄存器是数字电路中应用很广的电路之一。该电路由于由 FF 构成,因而属于时序逻辑电路。

延时功能

图 4.77 的例子,是由 D-FF 构成的 4 比特( $2^4 = 16$  位)寄存器。D-FF 具有 4.21 节所提到的延时功能,可将输入暂存,延时一个时钟周期后、将此输入原封不动地输出。

并行数据

如图 4.77 所示,每一同步时钟脉冲的下降沿将 4 比特并行数据读入 FF,而将其内暂存的数据输出。假如各 FF 内初始状态为 0000,而这时的输入  $D_1 \sim D_4$  的数据为 0110,第一个脉冲到来时,0110 被暂存,而内部原来的数据 0000 则由  $Q_1 \sim Q_4$  输出。如果下边的输入为 0111,第二个脉冲会将 0111 暂存,而将原存的 0110 输出。

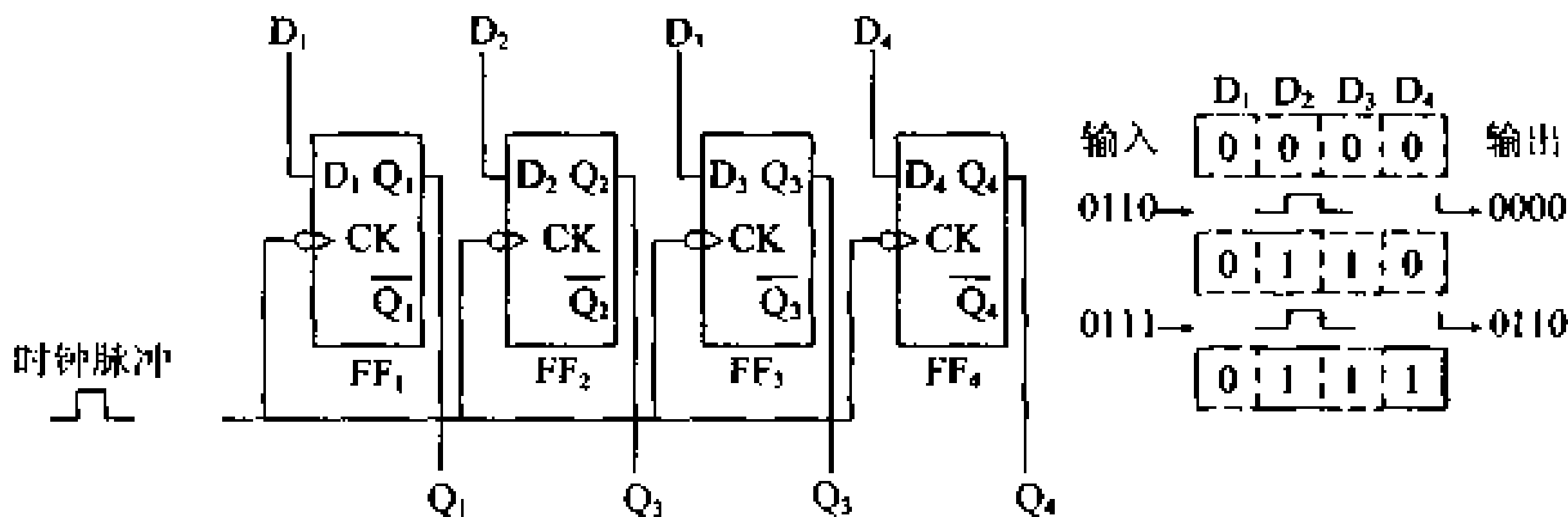


图 4.77 由 D-FF 构成的寄存器

移位功能

图 4.77 的寄存器是记忆并行数据的。但是输入数据时,也可方便地从高位向低位一位一位输入。像计算器中顺序 3、4 输入时,首先显示 3,接着 3 移到上一位,空下来的低位则显示 4。这种将暂存位置空出来而向下一位置移动的功能称为移位功能。使用这一功能就可以串行处理数据。用 FF 实现这一功能的电路称为移位寄存器。

移位寄存器

图 4.78(a)为由 D-FF 构成的 4 比特移位寄存器。与图 4.77

## 串行输入数据

一样, D-FF 暂存, 同步时钟脉冲到来时输出。这样一来, 从  $FF_1$  的  $D_1$  输入的数据就会一步一步地移位并暂存于  $FF_2$ 、 $FF_3$ 、 $FF_4$ 。而每一时钟脉冲到来时,  $Q_1 \sim Q_4$  都会有输出, 这样一来, 串行输入数据即可并行输出显示。

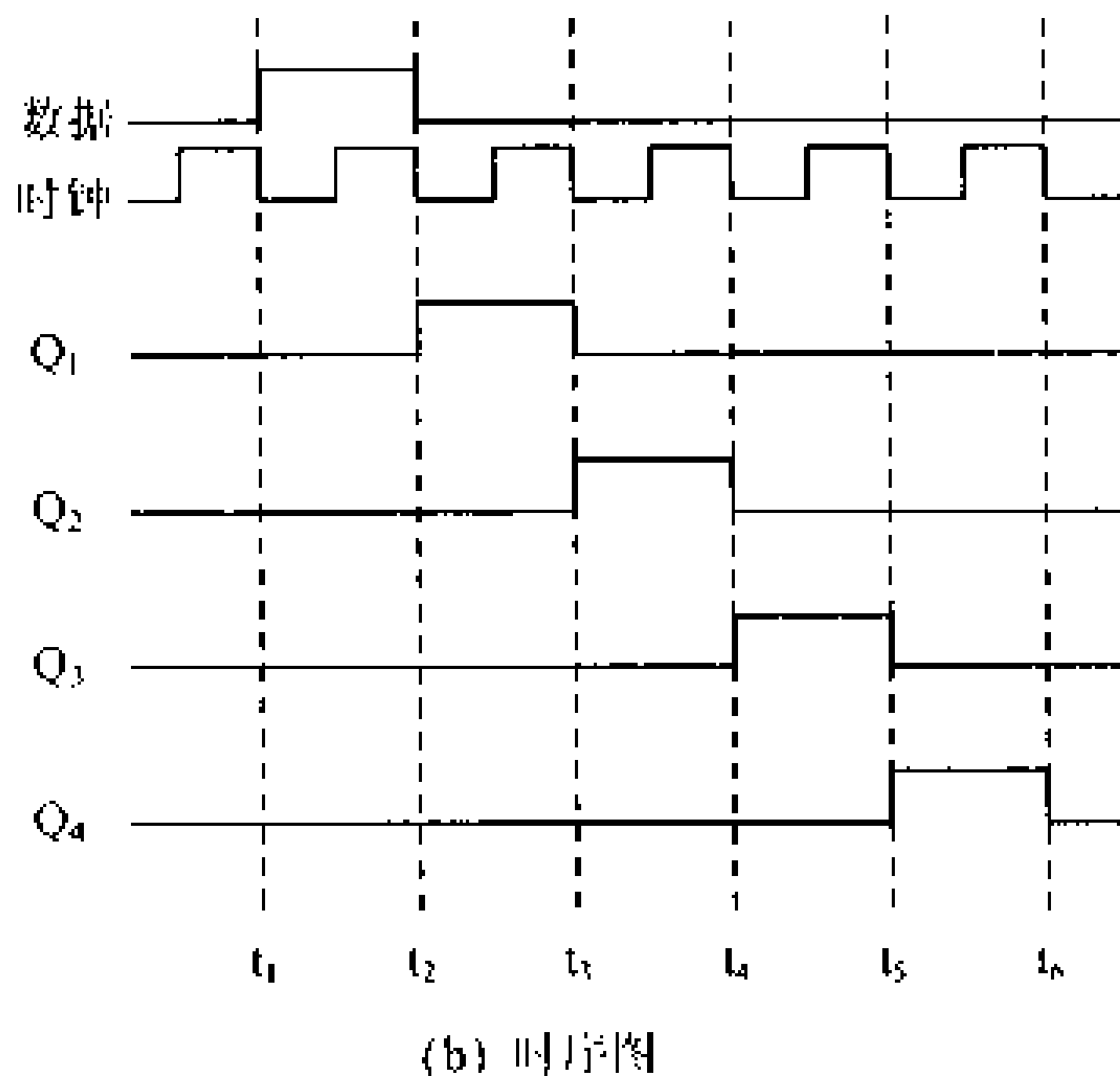
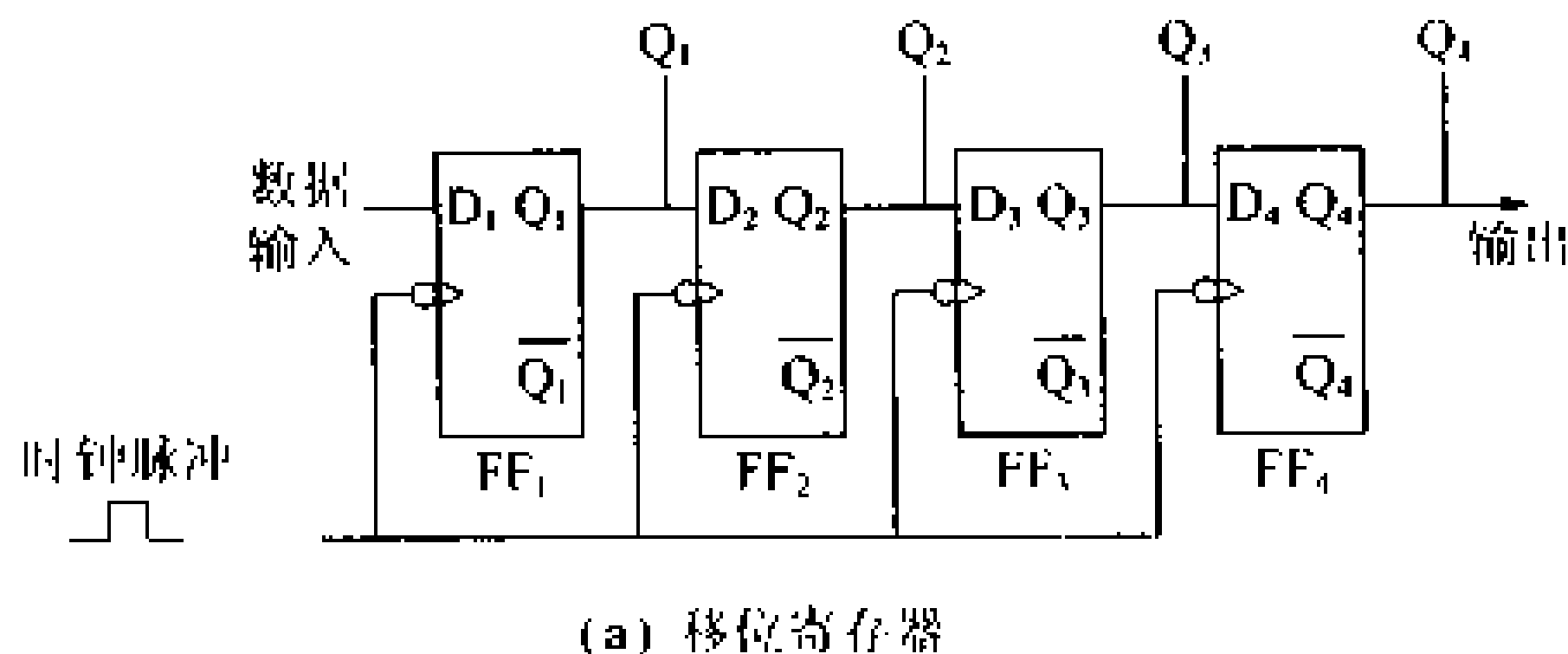


图 4.78 由 D-FF 构成的移位寄存器

## 时序图

这一连串的动作, 通过时序图很容易明白。图 4.78(b) 给出了各 FF 初始状态为 0、 $D_1$  的输入为 1 时的时序图。该例的 FF 的时钟输入端画有小圆圈, 因而是脉冲的下降沿到来时触发、输入数据发生变化。

## □ 相关知识 ● 用 JK-FF 构成 D-FF

寄存器的基本单元是 D-FF, 而 D-FF 通常是用 JK-FF 构成的。因而在教科书中多有用 JK-FF 直接描述寄存器的。但着眼于

D-FF 的工作原理则简单明了。如果能够理解 D-FF 和图 4.77、图 4.78, 试考虑一下用图 4.79 取代 D-FF 来构成的寄存器电路。

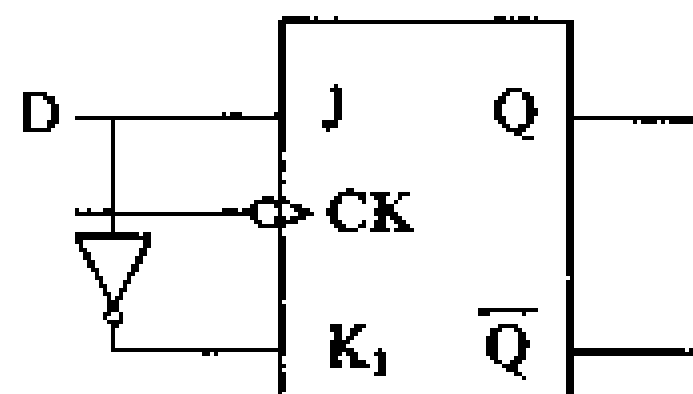


图 4.79 用 JK-FF 组成 D-FF

### ■ 必备知识

D-FF 会将前一刻的数据原样送出, 因而可以用作寄存器。

### ■ 测试题

用 JK-FF 构成 4 比特移位寄存器, 且用下降沿触发。并绘出输入为 1 时的时序图。

答 如图 4.80 所示。时序图与图 4.78 的  $Q_1$ 、 $Q_2$  相同。

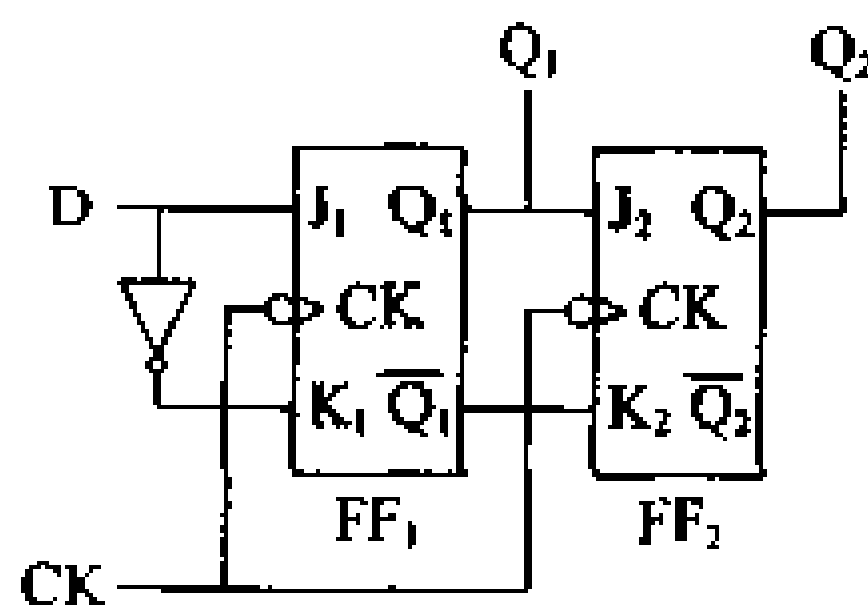


图 4.80

## 23 计数器及其原理

### □ 要点

数脉冲个数的电路称为计数器(counter)。脉冲计数利用的是每一脉冲都要引起输出翻转的触发动作。

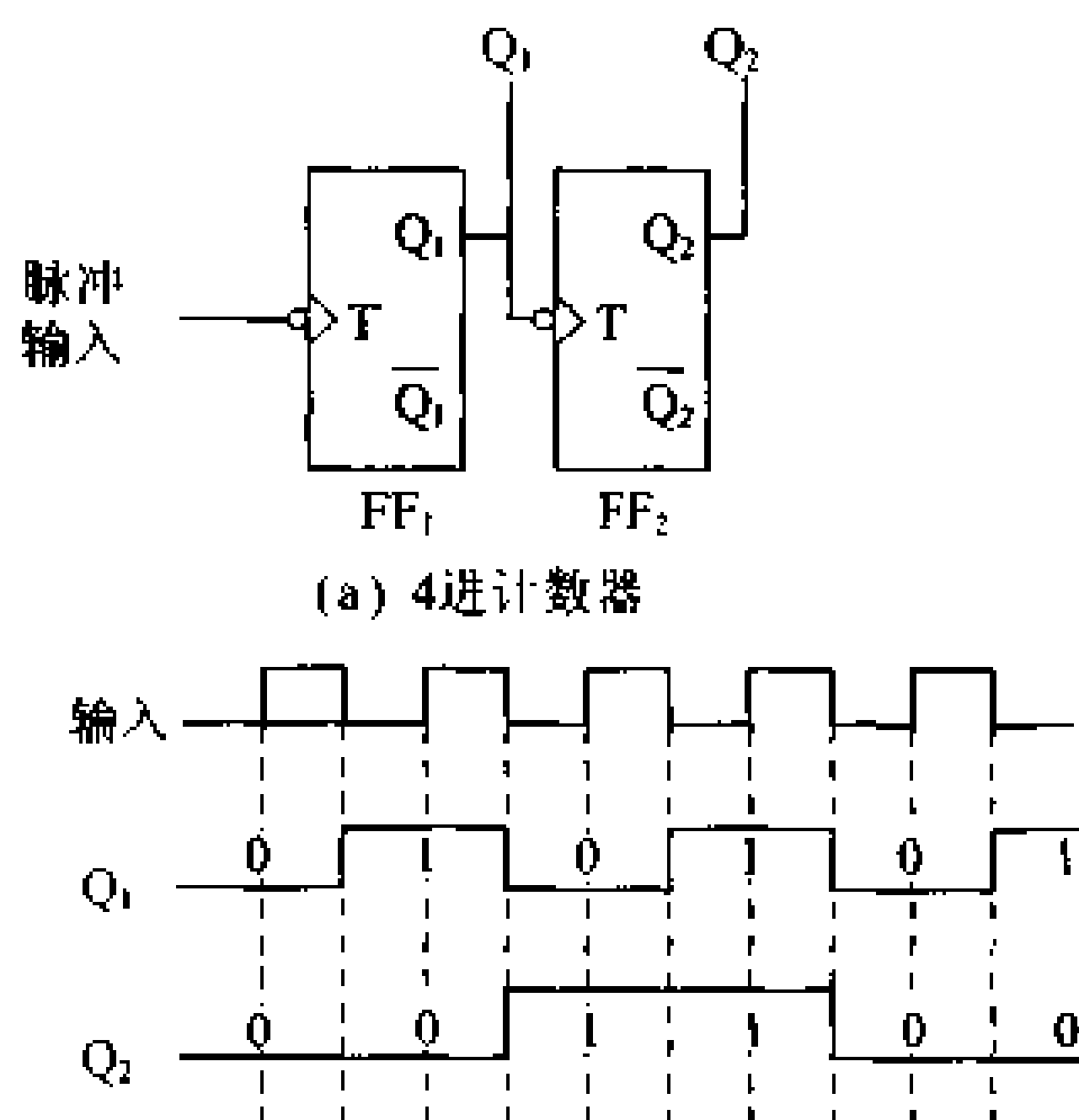
### □ 解释 ● 4 进计数器和环形计数器

#### 4 进计数器

#### 翻转

计数器电路最简单的例子是 4 进( $2^2$  进)计数器。图 4.81(a) 给出了由 T FF 构成的 4 进计数器电路。先看  $FF_1$ , 它有一个输入端, 具有脉冲下降沿触发的翻转功能。再看  $FF_2$ ,  $FF_1$  的输出  $Q_1$  就是它的输入, 同样是脉冲下降沿触发。

给输入端输入时钟脉冲、分析其动作时, 可用图 4.81(b) 的时序图来说明。首先, 脉冲 1 的下降沿使  $FF_1$  翻转,  $Q_1$  的输出由 0  $\rightarrow$  1, 脉冲 2 再使其由 1  $\rightarrow$  0。由于这一翻转动作是下降沿, 这时  $FF_2$  也会翻转,  $Q_2$  的输出由 0  $\rightarrow$  1。  $FF_2$  的下次翻转是第 4 脉冲时, 余类推。此动作与十进制计数的对应关系如图 4.81(c) 所示。



(a) 4 进计数器

(b) 时序图

十进制 计数	二进制计数	
	$Q_2$	$Q_1$
0	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1

(c) 计数顺序

图 4.81 由 T-FF 构成的 4 进计数器

FF<sub>1</sub> 为第一位,FF<sub>2</sub> 为第二位,其输出 Q<sub>2</sub>、Q<sub>1</sub> 为反复的 00、01、10、11。最大计数值为二进制的 11(十进制的 3),所以可以进行 4 进计数。

此例用的是 T-FF。由于 T-FF 是 J、K 输入为 1 时的 JK-FF,因而也可以用 JK-FF 来构成计数器。

环形计数器

另外还有其它各种计数器,例如图 4.82 所示的环形计数器。如图所示,环形计数器中,最后的 FF 的输出被反馈给最初的 FF。这里给出的例子是由 JK-FF 构成的。此电路的状态是一个 FF 置为 1,其它的 FF 均复位为 0。输入同步时钟脉冲时,这个 1 会顺次向后面的 FF 移动,按照与 FF 数量相同的脉冲个数循环一圈,因而它就是位数等于 FF 个数的周期计数器。常用来判断某种特定的计数值。

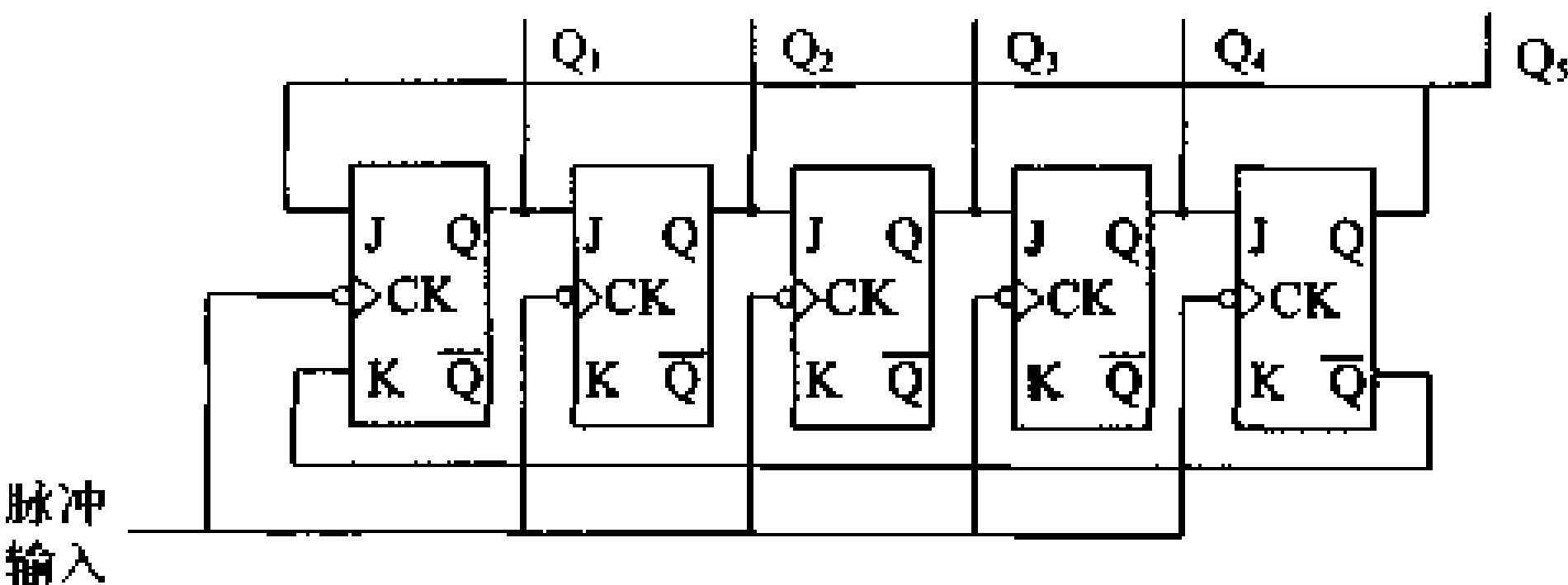


图 4.82 环形计数器

■ 必备知识 ■

因为计数器用的是翻转功能,因而可用 T-FF、JK-FF 来构成。

■ 研 究 ■

为对脉冲数量进行计数,也有使计数值下降的减计数器。使用 T-FF 进行 4 进计数时,只能是将图 4.81(a)的 Q<sub>1</sub> 作为 FF<sub>2</sub> 的时钟输入。试分析其动作。



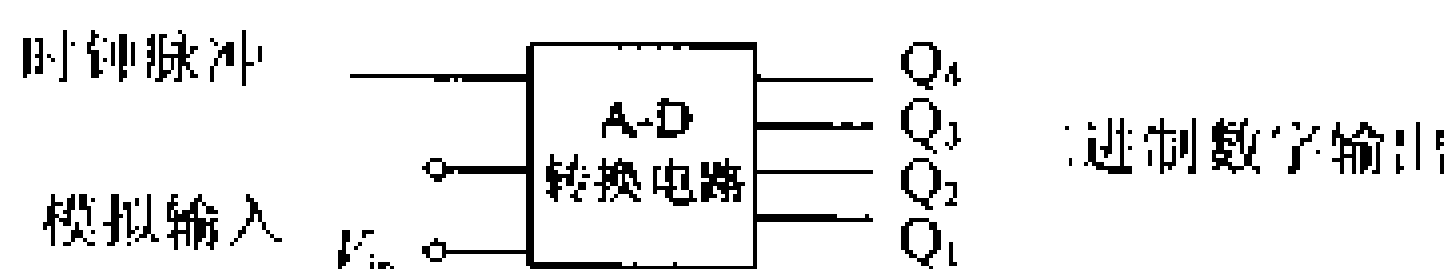
## 24 A-D、D-A 转换电路

**要 点** 将模拟量变为数字量的电路称为 A/D 转换电路, 将数字量变为模拟量的电路称为 D/A 转换电路。

**解 释** ● A-D 转换电路和 D-A 转换电路

A-D 转换

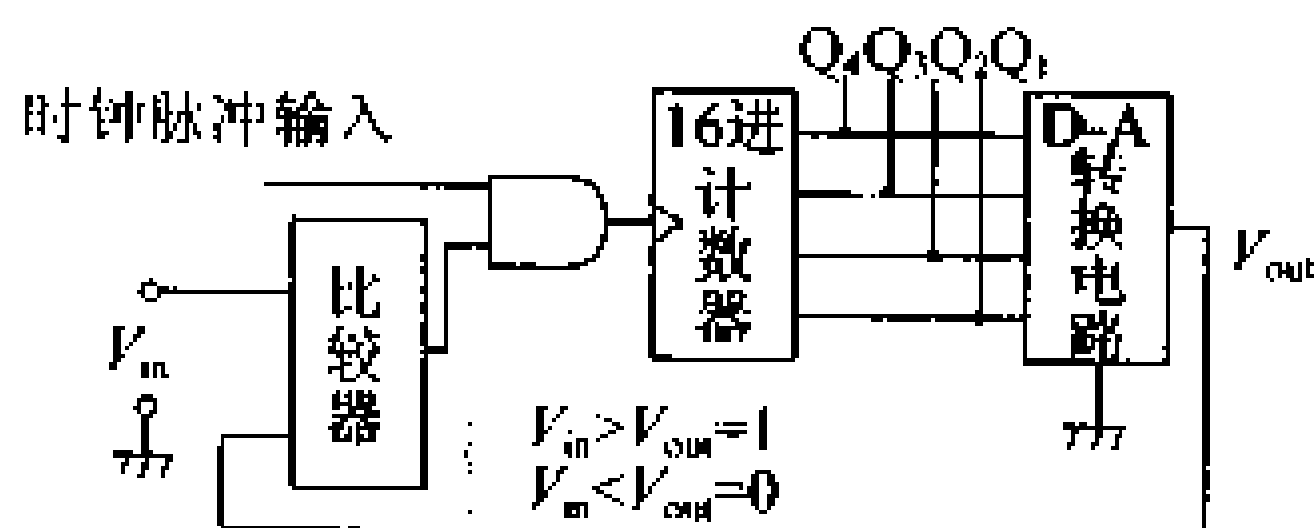
A-D 转换电路是要获得与模拟输入成比例的二进制数字输出的电路。图 4.83(a) 是其方框图。因为要进行数字控制, 因而有一个时钟脉冲输入端。图中  $V_{in}$  是输入电压, 输出为 0000~1111 的二进制 4 位 ( $2^4$  位)。



(a) 方框图

序号	模拟 $V_{in}$	二进制输出 $Q_4 Q_3 Q_2 Q_1$	序号	模拟 $V_{in}$	二进制输出 $Q_4 Q_3 Q_2 Q_1$
1	0	0 0 0 0	9	0.8	1 0 0 0
2	0.1	0 0 0 1	10	0.9	1 0 0 1
3	0.2	0 0 1 0	11	1.0	1 0 1 0
4	0.3	0 0 1 1	12	1.1	1 0 1 1
5	0.4	0 1 0 0	13	1.2	1 1 0 0
6	0.5	0 1 0 1	14	1.3	1 1 0 1
7	0.6	0 1 1 0	15	1.4	1 1 1 0
8	0.7	0 1 1 1	16	1.5	1 1 1 1

(b) 4 比特输出时的真值表



(c) 4 比特计数器块形 A-D 转换电路

图 4.83 A-D 转换电路

比较器

现假设  $V_{in}$  的范围为 0~1.5V。包括 0V 在内, 可用 16 的二进制数来表示, 则如图 4.83(b) 所示, 即可将模拟电压以 0.1V 的数字当量表示为数字量。在方框图的内部, 主要是用比较器将模拟量转换为数字量。图 4.83(c) 给出了其内部构成的例子。图中的  $V_{out}$ , 是将计数器的二进制输出变为模拟电压的输出。比较器中不

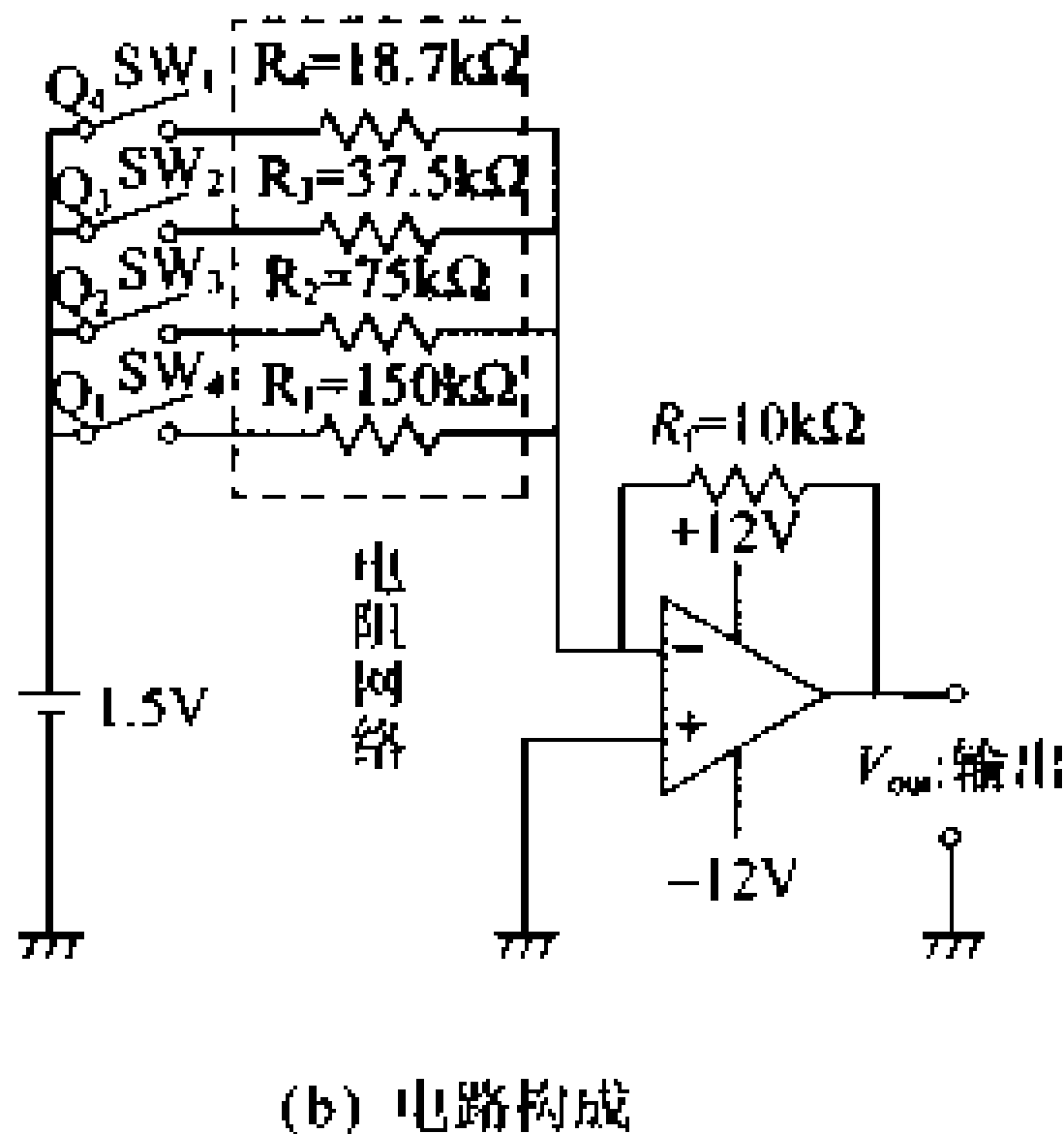
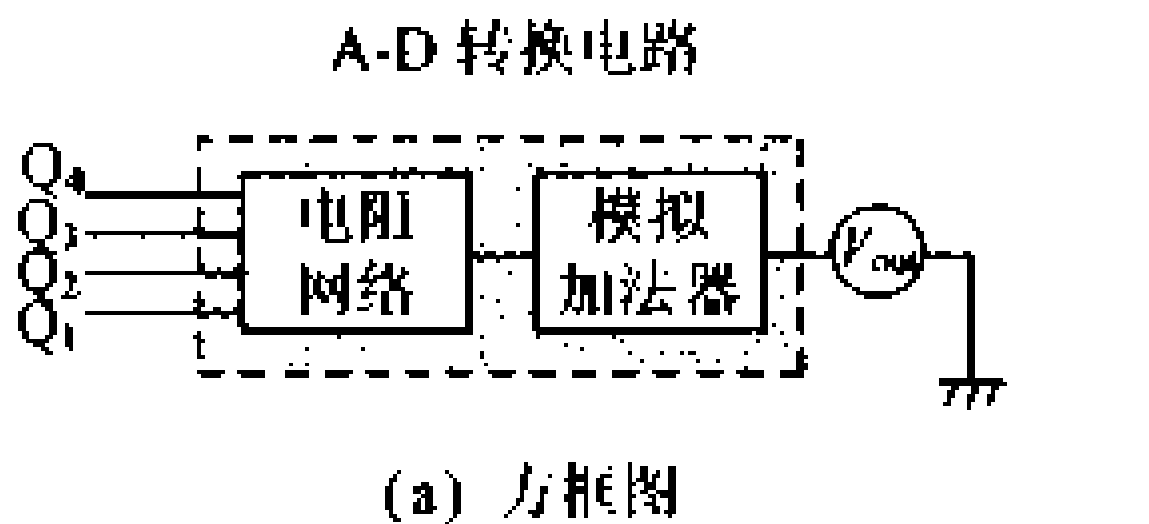


图 4.84 D·A 转换电路

进行比较

- 断与此电压进行比较,  $V_{in} > V_{out}$  时比较器输出 1,  $V_{in} < V_{out}$  时输出 0。
- 这样一来, 若数值分配如图 4.83(b) 所示, 设  $V_{in} = 1.24V$ , 则:
- ① 一开始计数器处于复位状态,  $V_{out} = 0$ ;
  - ② 比较器中  $1.24V > 0V$ , 因而输出为 1;
  - ③ 这个 1 打开 AND 门, 1 个时钟脉冲进入计数器;
  - ④ 计数器计数值增加为 0001;
  - ⑤ 因为是 0001, 根据图 4.83(b),  $V_{out} = 0.1V$ 。
- 反复重复步骤①~⑤, 每输入 1 个时钟脉冲, 计数值增加 1,  $V_{out}$  则依次变为 0.2、0.3、...1.2V 等;
- ⑥ 当  $V_{out}$  变为 1.3V 时,  $1.24V < 1.3V$ , 比较器输出为 0;
  - ⑦ AND 门因为输入为 0 而关闭, 无时钟脉冲输出;
  - ⑧ 计数器不变。

其最终结果是将输入  $V_{in}$  判断为 1.3V, 因而其二进制数字输出显示为 1101(参见图 4.83(b))。此即 A·D 转换电路的转换步骤。

D·A 转换器

在图 4.83(c) 的构成中, 将计数器的输出变为模拟电压, 用的就是 **D·A 转换器**。图 4.84(a) 是其方框图。图中, 二进制输入经电阻网络、模拟加法器后变为模拟量输出。其分析方法如下。

因为数字电路的表现不是 1 就是 0, 因而可用模拟开关来代

替它。所以,可以用二进制输入来打开、关闭开关,并经适当的电阻连接到加法器。加法器进行与计数当量相符的运算,而得到与二进制输入相当的模拟电压。这里的加法器用的是运算放大器,其具体的电路构成如图 4.84(b)所示。

## ■ 研 究

图 4.83 中,如果  $V_{in}$  的范围为  $0V \sim 3.0V$ ,试考虑应如何确定数字当量。

## 25 脉冲调制解调电路

### □ 要 点

将信息变为电信号可以有效地传向远方,为此常采用将信号波搭在载波上的方法,此称之为调制。相反,从载波中提取信号则称之为解调。脉冲调制解调电路,即是以离散的数字形式进行此调制解调的电路。

### □ 解 释

#### ● PAM 与 PCM

调制

要进行调制的电信号波大多为模拟量。此模拟量是随时间连续变化的。利用 4.24 节的 A/D 转换电路,首先将原来的连续变化量,按一定的时间间隔(此称为离散)进行选点,然后检查所选点的值相对信号预计最大值所处的位置,最后将其用二进制数字表示出来。这里的选点操作称为采样,所选点的信号值称为样本。确定信号所处的位置称之为量化。

采样  
量化

载波  
解调

脉冲调制,首先像 A/D 转换那样,将信号波按一定的同步脉冲进行采样,用这些采样值来表示信号。其次,将含在信号中的信息连同一定的同步脉冲一起于采样间隙放在载波上发送出去。信息接收方,则进行解调,用同步脉冲提取原采样值,再构成信号波形。

振幅调制

PAM

脉冲编码调制

PCM

脉冲调制可分为模拟方式和数字方式两种。前者样本的振幅是连续变化的,其代表调制方式为脉冲振幅调制(pulse amplitude modulation),即 PAM。后者样本的振幅是预先确定的,虽然离散但振幅保持一致,其代表调制方式为脉冲编码调制(pulse code modulation)PCM。

最简单的 PAM 的例子如图 4.85 所示。图 4.85(a)的信号波被均匀采样,其采样值分别与采样瞬间的信号幅值成比例。如图所示,PAM 有双极性(图 4.85(b))和单极性(图 4.85(c))两种。前者如同信号波的幅值,有正有负。后者被有意加于某一固定的直流电平上,得到的全是正脉冲。PAM 易受调制干扰,不太使用。其优点是解调声音信号简单。

PCM 的构成如图 4.86 所示。PCM 和 PAM 一样都要进行采样,但是其数字化的方式不一样。如图所示,PCM 的发生电路中,和 A/D 转换一样,要进行采样→量化→数字化编码(由编码器实行),用二进制数近似地表示幅值。此近似程度根据需要可以提高。经调制的编码信号可通过传送线路或无线电发射来传送。接收方用解码器将其变为二进制数后,再通过脉冲变换电路对信号进行解调,最后将不需要的高频成分用滤波器滤去,得到信号波。

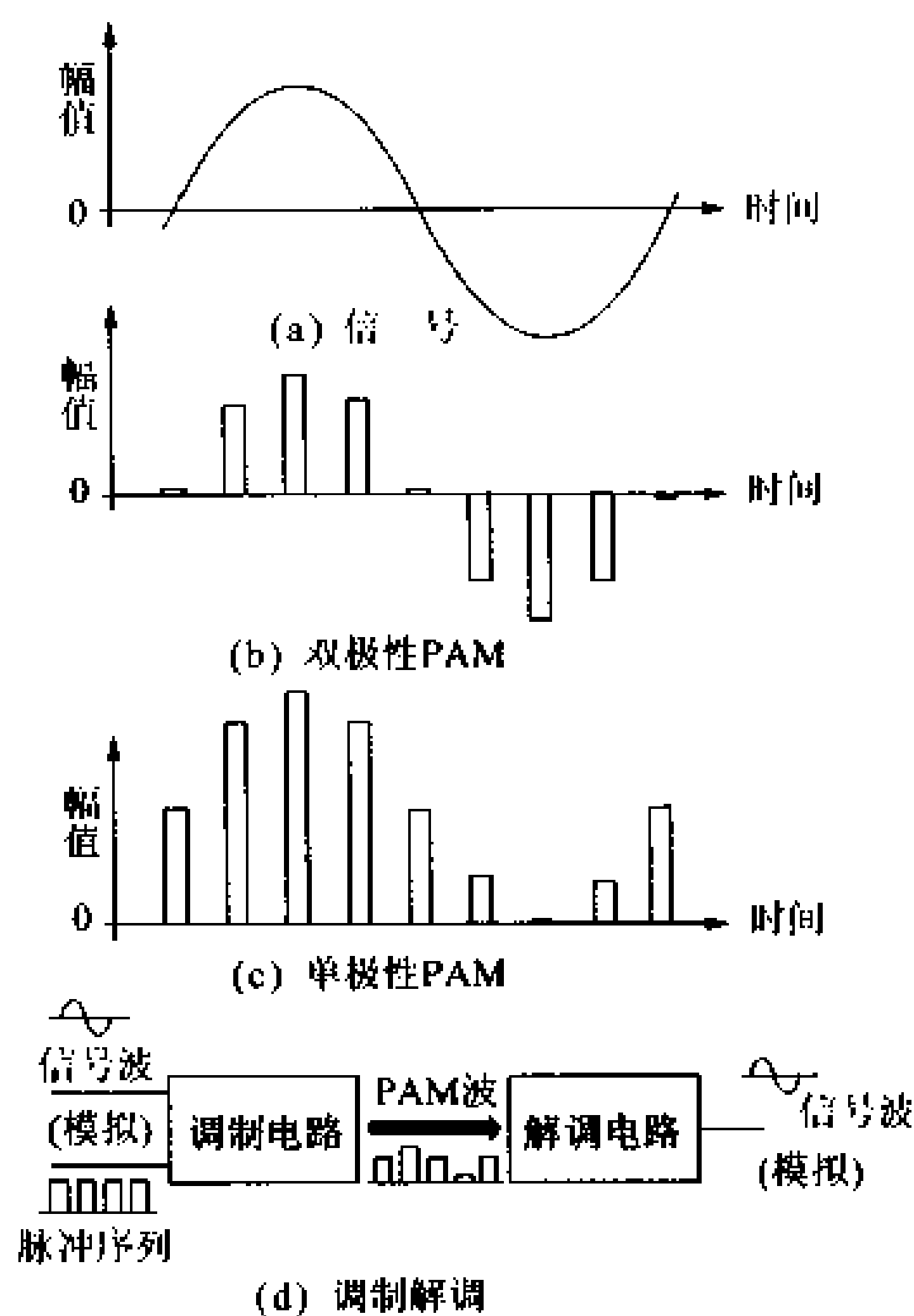


图 4.85 PAM 的例子

与 PAM 相比,PCM 的方式更具数字特征。采样过程,两者可以说是相同的,但是,PCM 在采样后通常要用 A/D 转换器对其进行二进制编码。这是在脉冲调制中将其划归为数字方式的主要原因。

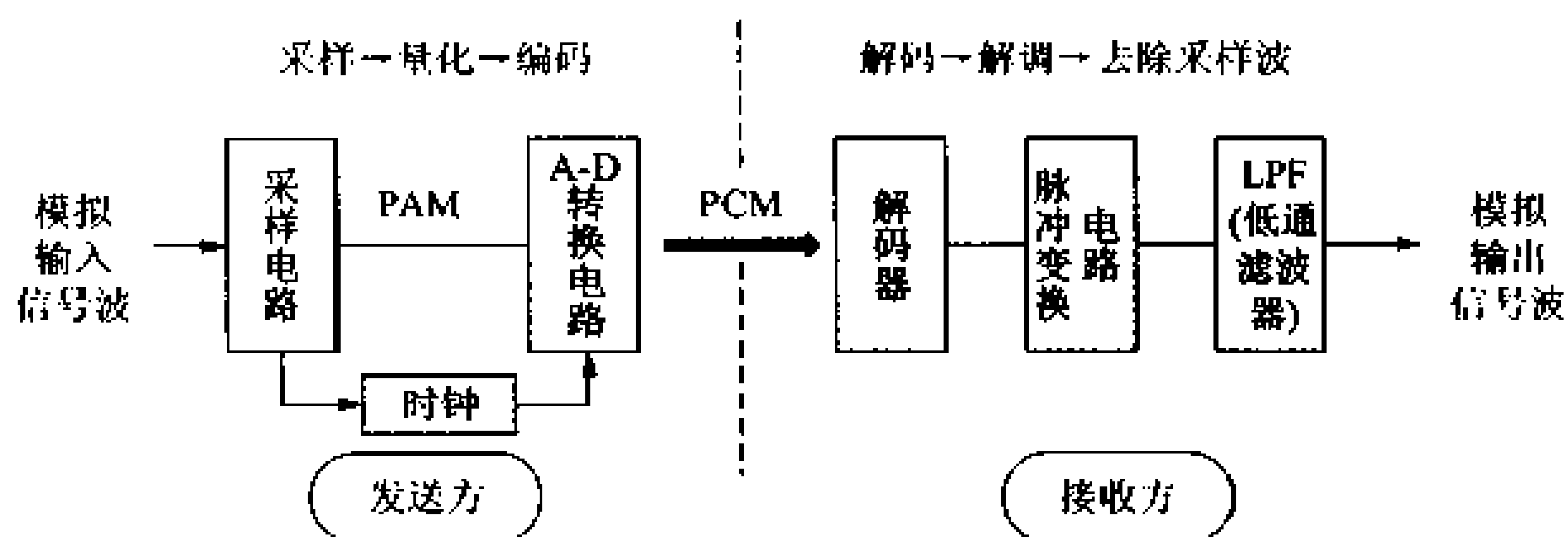


图 4.86 PCM 的构成

## □ 相关知识 ● 采样定理

如 4.24 节所述,将连续的模拟量变为数字值时要按一定的时间间隔抽样并得到数据,这一过程称为采样。很显然,采样数目越多,原来的信号波形越能忠实地再现。

奈奎斯特采样  
定理

但是这里要问,样本的数目要抽到多少才能不失真地再现信号波形?根据奈奎斯特采样定理(sampling theorem),要再现信号波所携带的信息,采样频率  $f_s$  [Hz] 至少要为信号带宽  $B_m$  [Hz] 或者说是信号中的最高频率  $f_h$  [Hz] 的 2 倍。用公式表示时,即为:

$$f_s \geq 2B_m, \text{ 或者 } f_s \geq 2f_h,$$

奈奎斯特频率

所以,不失真的最低采样频率为  $f_s = 2B_m$ , 此称为奈奎斯特频率。

## ■ 必备知识

PAM 只是采样,PCM 则要采样→量化,直至编码。

## ■ 例 题

将模拟量变为数字值时,正确的步骤是下边哪一个?

- ① 采样→编码→量化      ② 量化→编码→采样  
③ 采样→量化→编码      ④ 量化→采样→编码

**解说** 如 229 页所述,步骤如下:

模拟量→采样→量化→编码→数字值

**答** ③

## 26 数字钟表的构造

**要 点** 以使用 TTL-IC 的数字钟表的电路构成为例,对身边的数字电路的实用进行说明。

**解 释** ● 数字振荡/钟表的分频电路

时间可用对一定周期的脉冲进行计数来表示,因而数字钟表的核心是计数器电路(参见 4.23 节)。图 4.87 给出了用计数器构成钟表的例子,计数器的使用方法如下。首先要用表示 AM/PM(上、下午)的 2 进计数器。其次,众所周知小时是 12 进制,因而要用 12 进计数器。分和秒是 60 进制,所以可将 6 进计数器与 10 进计数器连用。对于各计数器的输出,使用 7 段 LED 作为译码器(7 段 LED 为十进制显示用的特殊译码器)。对于时、分、秒的显示,各要 2 只 7 段 LED 即可对计数值进行显示。

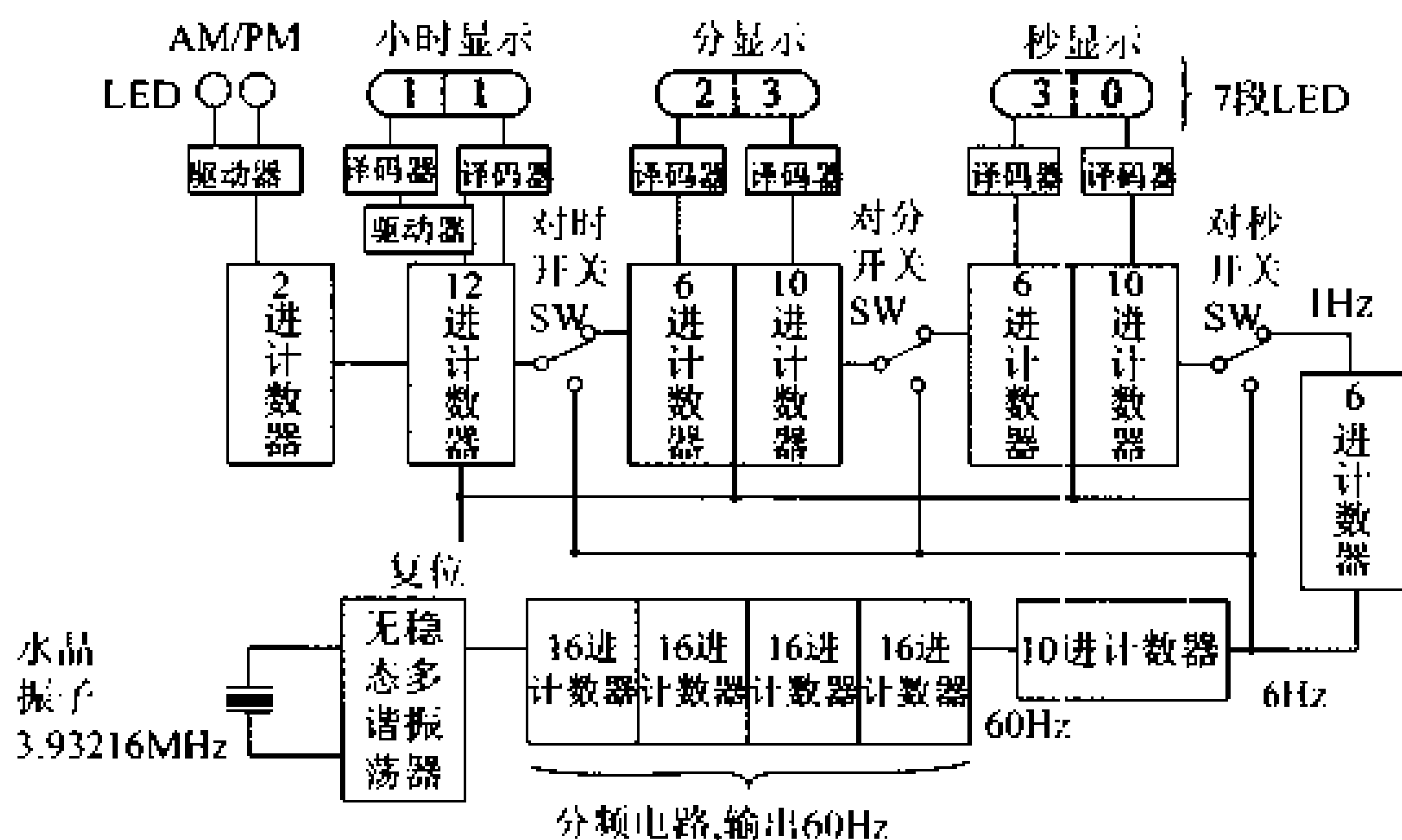


图 4.87 由计数器构成的数字钟表

图 4.87 计数电路的工作情况如下。首先产生一定周期的脉冲,其后每过一秒计数器加 1 并分别显示出时、分、秒。在手表等的电路中,脉冲源用的是晶体振荡器(振荡频率为 3.93216MHz),经 16 进计数器组成的分频电路,最初得到 60Hz 的脉冲。再经后续的 10 进计数器、6 进计数器,  $60\text{Hz} \rightarrow 10\text{Hz} \rightarrow 1\text{Hz}$ ,即得到每秒 1 次的数字脉冲。使用家用交流电源(50Hz 或 60Hz)时,可用斯密

晶体振荡器  
分频电路  
数字脉冲

特触发器将其变成脉冲后当作脉冲源使用。这时无需分频,将斯密特电路的输出送入 10 进计数器即可。但是,50Hz 时,需将后面的 6 进计数器换成 5 进计数器。

如上所述,数字钟表是以 1Hz 的脉冲为基准,1 秒 1 个脉冲,由秒、分、时、AM/PM 各计数器顺序计数,最后得到时间。对表的时候,切换内藏的数字开关,从 10 进计数器直接引出 6Hz,即可以每秒 6 个脉冲的速率改变显示。实际制造时,计数器用计数器专用 TTL-IC 构成,16 进、12 进、10 进、2 进分别用的计数器 IC 为 SN793N、SN7492N、7490N、7472N。7 段译码器用 SN7447AN,开关电路用 AND、NAND、OR 门 IC。脉冲源市面有售,买来使用非常方便。

TTL-IC

□ 相关知识 ● 12 进制显示

12 进计数器的真值表如图 4.88 所示。这里来看一下小时的高位显示。从真值表可知,高位显示只用于最后的 10 和 11,因此,判断时只考虑  $Q_4$ 、 $Q_2$  同时为 1 的情形即可。

计数	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
⋮			⋮	
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	0

此情况下高位显示1

图 4.88 12 进计数器的真值表

■ 研 究

小时的显示由 12 进变为 24 进时,试考虑钟表的构成有何变化。



## 27 锁相环与频率合成器

### □ 要 点

锁相环是数字电路的应用之一,利用它可以构成频率合成器。锁相环是将输入信号与基准信号的相位进行比较,以检出的相差为根据对输出进行修正,使其频率与基准信号同步的电路。锁相环有数字锁相环与模拟锁相环之分。频率合成器用于电视和通信设备的选台电路技术,以及使用声音合成的 MIDI 的 FM 声源中。

### □ 解 释 ● 锁相环

图 4.89 给出了锁相环 PLL(phase locked loop)的基本构成。PLL 大致由比相器(PC; phase comparator)、压控振荡器(VCO; voltage controlled oscillator)和低通滤波器(LPF; low pass filter)三电路构成。

比相器

压控振荡器

低通滤波器

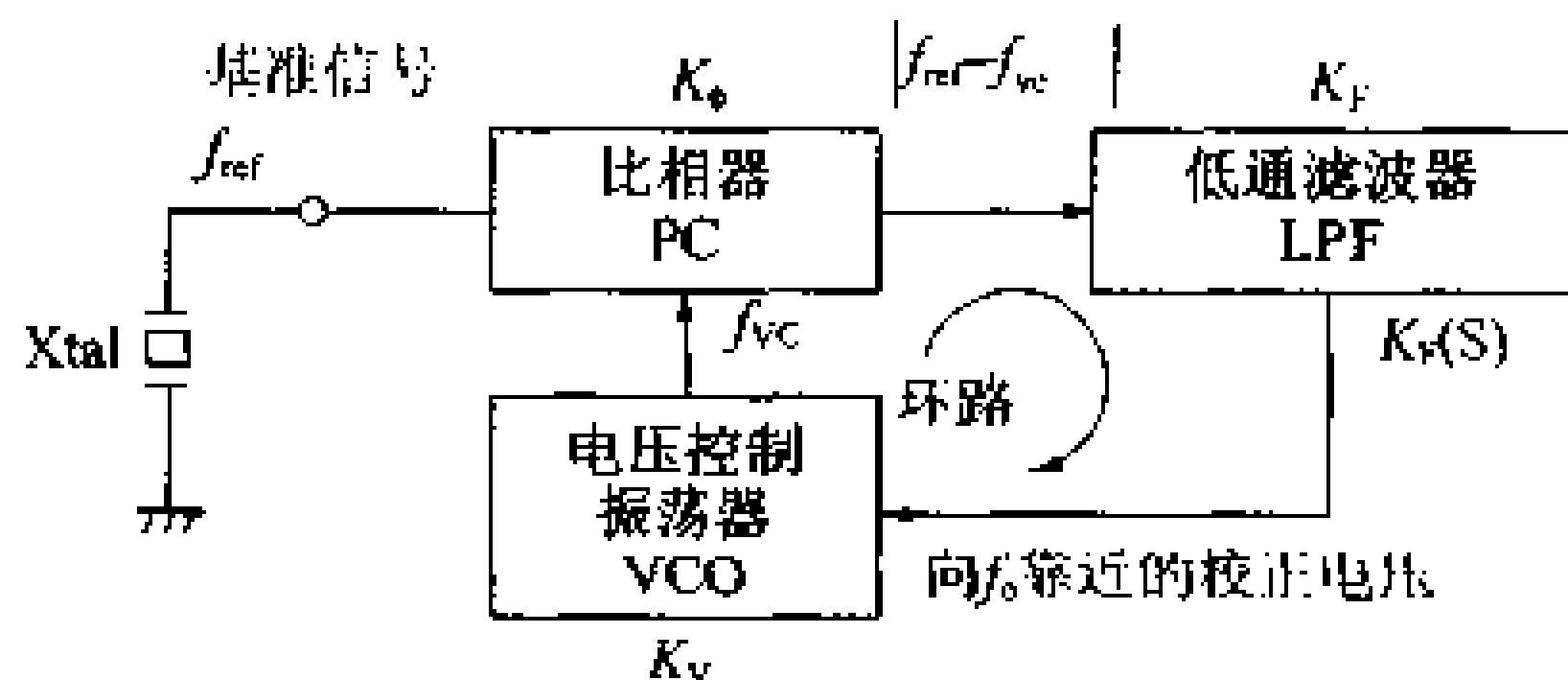


图 4.89 锁相环的构成

基准信号  $f_{ref}$  和 VCO 的输出信号  $f_{vc}$  送入 PC 比相,输出误差  $f_{ref}-f_{vc}$ ,再经 LPF,从 PC 的输出中提取直流成分而得到校正电压。VCO 在此校正电压的作用下使其输出信号  $f_{vc}$  跟随基准信号  $f_{ref}$ 。在此环路的反复作用下 VCO 的输出  $f_{vc}$  信号正确地与基准信号  $f_{ref}$  同步。环路的这种状态称为 VCO 锁定,环路锁定所需的时间称为锁定时间,这表示 PLL 的响应速度。这时 PLL 的传递函数  $H_s$  为

$$H_s = \frac{K_p \cdot K_v \cdot K_f(S)}{S + K_p \cdot K_v \cdot K_f(S)} \quad (4.14)$$

式中  $K_p$ ——比相器的增益常数[V/rad];

$K_f$ ——滤波器的增益;

$K_v$ ——VCO 的变换增益[rad/V·S];

传递函数

$K_F(S)$  为滤波器的传递特性。

### ● 频率合成器

频率合成器的例子如图 4.90 所示。所谓频率合成器,即是以能够产生频率稳定信号的晶体振荡器为基准进行信号合成,并能够获得任意频率且具有与晶体振荡器一样频率稳定度的信号的信号源。这里,对频率合成器作一说明。

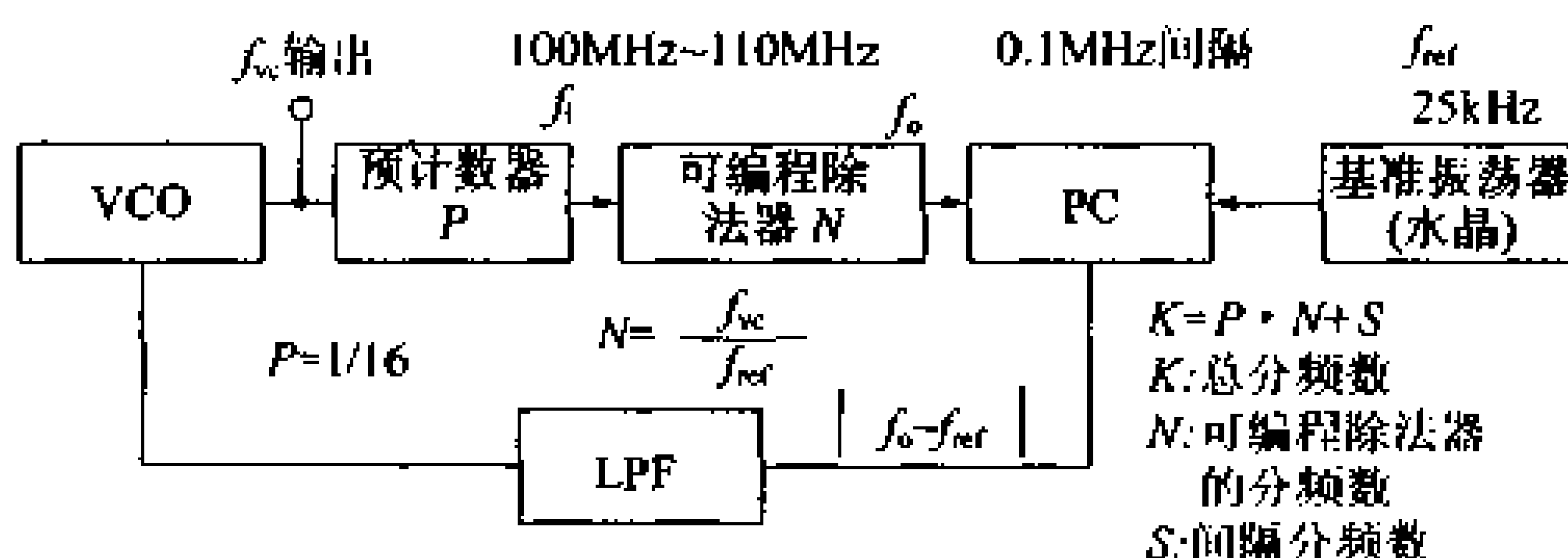


图 4.90 频率合成器

### 频率合成器

在 PLL 的里面再接一个可编程除法器,即可构成频率合成器。假设基准信号频率为  $f_{ref}$  [Hz], 输出信号频率为  $f_{vc}$  [Hz], PLL 完全锁定时,下式成立:

$$f_{ref} = \frac{f_{vc}}{K} \quad (4.15)$$

$$f_{vc} = K \cdot f_{ref} \quad (4.16)$$

式中,  $K$  为整数(1, 2, 3, ...), 所以  $f_{vc}$  可以按  $f_{ref}$  的整倍数进行变化。可编程除法器,对振荡器频率进行分频,使输入频率 10 倍频、100 倍频,或者说按 1:10、1:100 等所希望的倍率变频。因而这里是数字分频。分频是在 VCO 和 PC 间进行,所以可以正确地改变 VCO 的振荡频率。这样一来,就能用一个基准振荡器(如水晶)得到很多个频率稳定的信号。

例如,设基准振荡器频率为 25kHz,想要得到 VCO 的振荡频率为 100~110MHz(间隔为 100kHz)时,式(4.15)变为

$$K = \frac{100M}{25k} = 4000 \text{ 倍。}$$

使用计数器进行最初的 16 分频后,后面除法器的分频数则为

$$N = \frac{4000}{16} = 250$$

间隔为 100kHz,要得到 100.1MHz 时

$$K = \frac{100.1\text{M}}{25\text{k}} = 4004$$

这时,只需给总分频数上加 4 即可。

## 应用基础 ● 脉冲数字电路中噪音的抑制

3.14 节中,将要对电路噪声抑制进行说明,这里先对数字电路中噪音的抑制作一归纳。数字电路中产生的噪音,多发生于处理高频成分的器件的开关动作上,其原因为:

- ① 失调,以及反射损耗等;
- ② 阻抗不匹配(失配);
- ③ 来自外部(如电源线)的干扰;
- ④ 数字电路自身噪声,以及 LCR 耦合噪声。

其抑制对策为:

- ① 查找噪声的发生源以及侵入路径;
- ② 交流隔离;
- ③ 防止静电(检查地线、适当的屏蔽);
- ④ 使用防噪器件。

常用的噪声抑制器件有以下几种(图 4.91):

- ① 磁芯:可将高频噪声变为热;
- ② 三端电容器:将高频噪声引入地;
- ③ 各种滤波器(有电磁干扰、线间干扰时),  
仅让有用的信号通过。

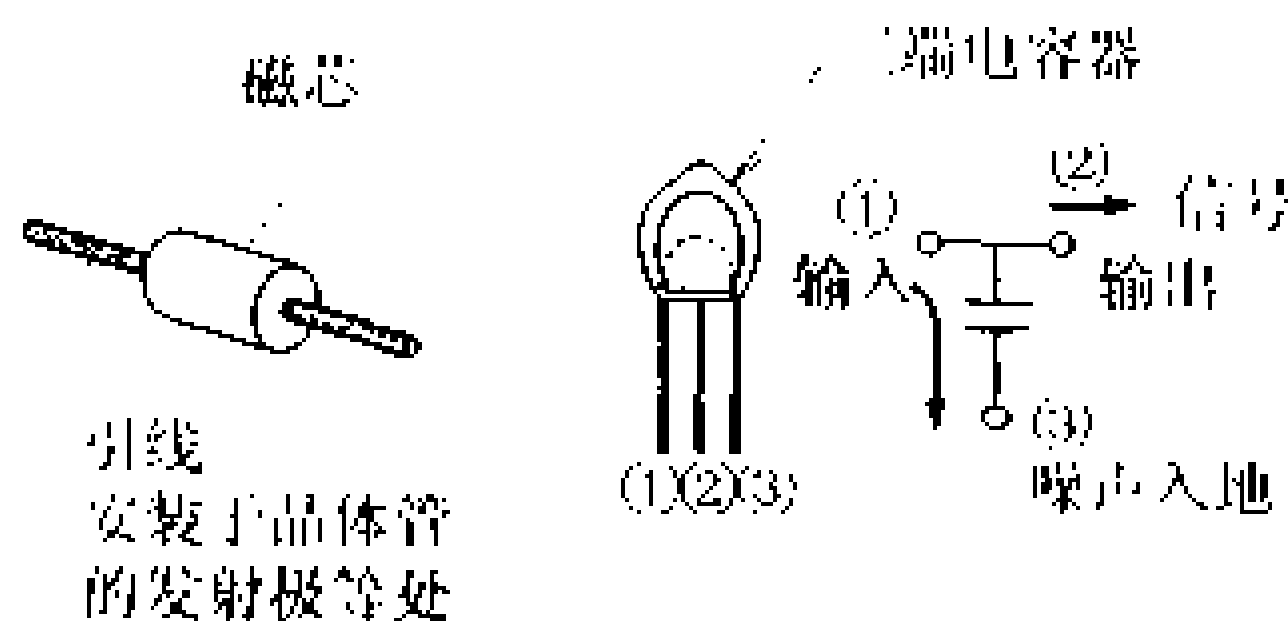


图 4.91 噪声抑制器件

### 数字电路的仿真

我们生活中所使用的许多东西,都是在制造前经过反复的仿真实验以后才制成的。计算机进行仿真非常方便,个人计算机上能够方便地进行电子电路仿真的软件很多。

图示为 4 进计数器时序图动作的仿真图,所用的仿真软件为用于 Apple Macintosh(通称 MAC)、称作 Design Works 的逻辑电路仿真软件。图中,J、K 端接到电源的正极上,接通时钟脉冲,当开关掷向 1 时,下部的时序图就流动起来进行仿真。

此外还有很多电子电路仿真,自有的个人计算机中的硬、软件也可利用。设计的东西经仿真后再制造即可减少失败。仿真对于学习也很有用,因而使用价值很高。

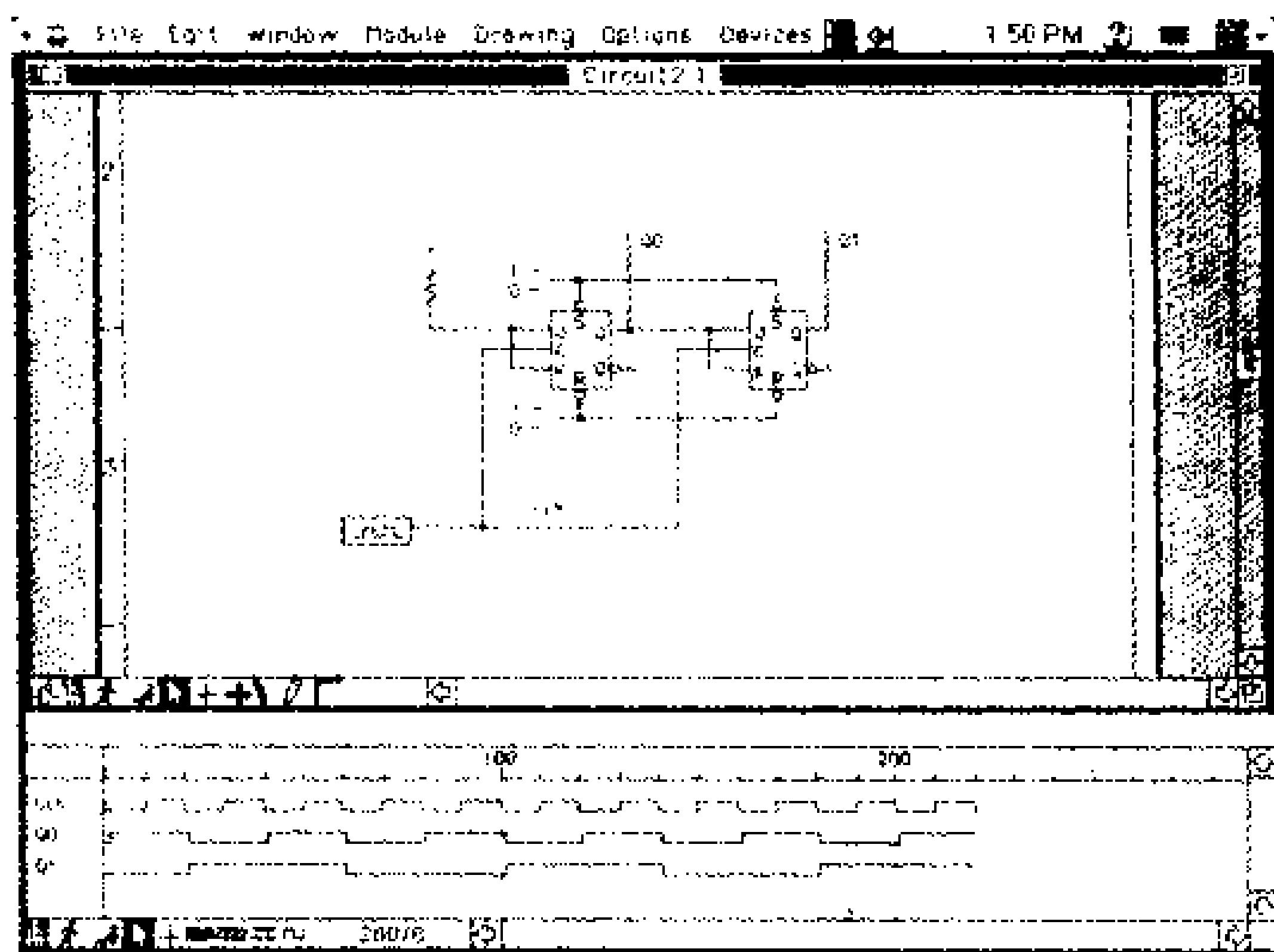


图 4 进计数器的仿真



## 第5章

# 电子测量

电子技术的发展一日千里。与此同时，各种测量仪器的发展也是大步前进，日新月异。曾经是模拟仪表代表性产品的动圈式仪表，随着数字技术的进步，已经变成数字仪表；示波器已不再是只显示波形，而是成了既能显示波形，又能同时显示电压值、周期、测量日期等各种参数和数据，还能进行画面硬拷贝等的多功能仪器。

本章将介绍随着技术发展而出现的新型仪器的使用方法及电子测量的基本知识，还将说明如何根据测量目的选用测量仪器。由于数字技术已经相当发达，本章也将对数字信号和高频信号的各种测量以及瞬变电子现象各种参量的记录方法进行适当的介绍。读者在学习其它章节时碰到与测量有关的不懂之处，可以返回来阅读本章内容。

- 责任编辑  
    扇 浩治
- 执    笔  
    扇 浩治

# 1 测量与误差

□ 要 点

我们的周围存在着各种各样的量。从大的方面分类,可分为连续量(模拟量)和不连续量(数字量)二类,所谓测量就是对这些量进行计量。要测量就会出现误差。误差表示测量值偏离真实值的程度。

□ 解 释

模拟量

● 模拟量与数字量

所谓模拟量是指连续变化的量。例如时间、重量、电压和电流等大小连续变化的量就是模拟量。“这件工作竟用了 1 小时 37 分”这类非整数的量,也表明它是模拟量。我们周围有很多量都是这样的模拟量。

数字量

数字量则表示不连续的量。例如,开关接通还是没接通,比规定的电压高(H)还是低(L)等。“开关似通非通”之类的中间量,在数字量中是不存在的(图 5.1)。

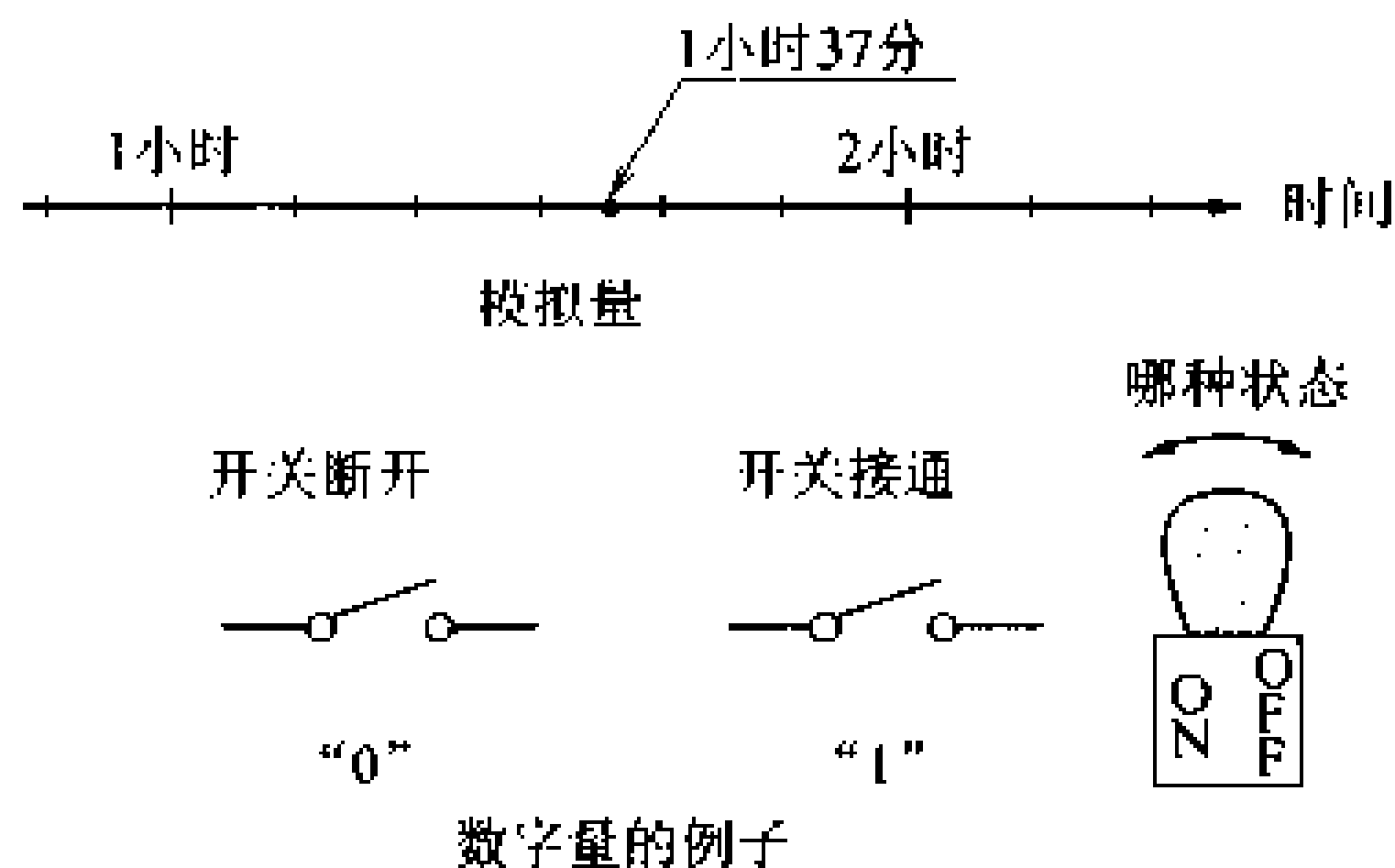


图 5.1 数字量和模拟量

● 误差的原因与校正

测量

测量就是测定某个量。用测量仪表测量电压和电流等得到的值未必是它的真实值。常常不是比真实值大就是比真实值小,二者之差称为误差(error),用  $\epsilon$  表示。产生误差的原因如表 5.1 所示。

误差

减小误差的对策,首先是减小人为误差。为此,必须有充分的睡眠时间,平心静气地进行测量。

误差  $\epsilon$ 、测量值  $M$  和真实值  $T$  之间的关系如下:

表 5.1 产生误差的原因

原 因	实 例
人为误差	<ul style="list-style-type: none"><li>• 读错数字</li><li>• 因人而异的读数误差</li><li>• 由于紧张或疲劳而读错</li></ul>
仪器性能	<ul style="list-style-type: none"><li>• 仪器运动部分的摩擦阻力以及部件的劣化所造成的误差</li><li>• 数字仪表的 A-D、D-A 转换误差</li></ul>
使用环境的影响	<ul style="list-style-type: none"><li>• 测量场所的温度、湿度、气压的不同或上述环境变化大的场所</li><li>• 在接近电波或强磁场的地方</li></ul>

$$\epsilon = M - T \tag{5.1}$$

误差与真实值相比所占的比例称为相对误差  $\epsilon_0$ 。

$$\epsilon_0 = \frac{M - T}{T} \times 100 \text{ [\%]} \tag{5.2}$$

图 5.2 中,设电路中流过 10.00mA 的电流,而从一般仪表上读得的值为 10.20mA,则误差为  $\epsilon = 0.20\text{mA}$ ,相对误差  $\epsilon_0$  为

$$\epsilon_0 = \frac{0.20}{10.00} \times 100 = 2 \text{ [\%]}$$

如果该误差是仪器的总误差,那么对指示值引入 0.20mA 的校正量就可以了。也就是说,校正值为  $\alpha = T - M$ ,校正率为

$$\alpha_0 = \frac{T - M}{M} \times 100 \text{ [\%]}$$

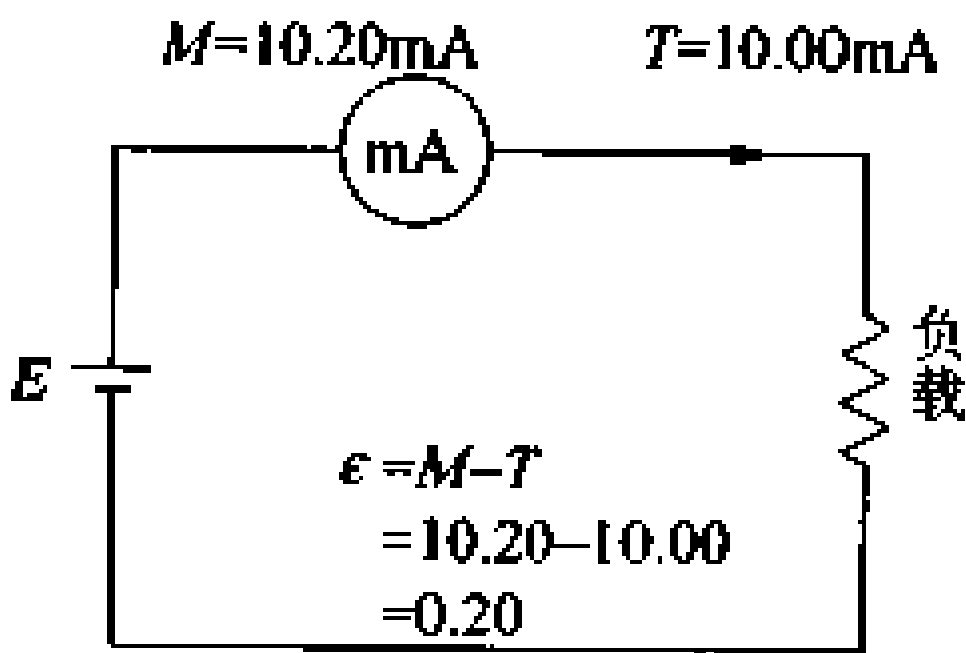


图 5.2 求误差



## 2 仪表的分类与使用

**要 点** 仪表可分为模拟仪表和数字仪表。其区别在于它是否用指针指示电压或电流的值,或是通过模/数转换后以数字显示。本节先来研究模拟仪表。

**解 释** ● 模拟仪表的分类

模拟仪表是指将电学量变成指针的偏转量,直接读取偏转值的仪表,指针式电压表和电流表即为这种仪表。表 5.2 为模拟仪表按工作原理进行的分类。在 7 类代表性的仪表中,最通用的是动圈式仪表以及由动圈式仪表组合而成的热电式和整流式仪表。

表 5.2 模拟仪表的工作原理

符号	种 类	工作原理与特点	电路	应用
	动圈式	磁铁磁场与动圈磁场之间的反作用力	直流	电压表 万用表
	动铁式	作用于可动铁片的电磁力,可测量频率小于1kHz的量	只用于交流	电压表 电流表
	整流式	整流器+动圈式 不适于测量0.1V以下的量	交流 直流	电压表 电流表
	电动式	基于固定线圈与动圈之间的电磁力	交流 直流	电流表 电压表
	热电式	热电偶+动圈式 测量频率可达100MHz	交流 直流	电流表 功率表
	静电式	响应慢,但可测量高电压(达50万伏)	交流 直流	电压表
	感应式	涡流与交链磁通之间的反作用坚固耐用	交流	功率表

### ● 模拟仪表的使用方法

图 5.3、图 5.4 分别为模拟仪表的外观及仪表面板。有关仪表的各种符号、误差范围、仪表放置方法、适用的电路以及仪表的分类分别示于表 5.3、表 5.4、表 5.5。

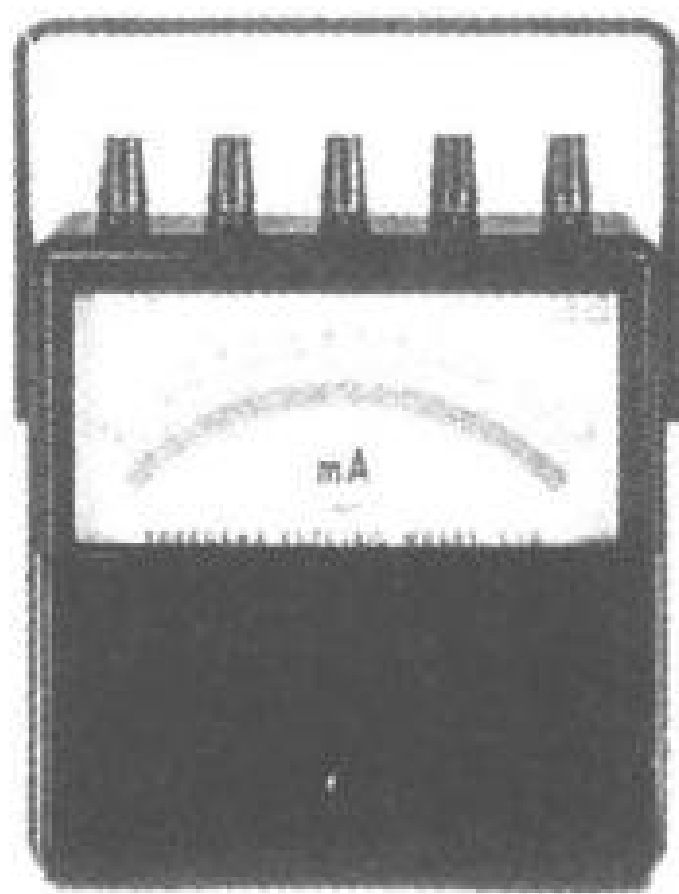


图 5.3 模拟仪表的外观

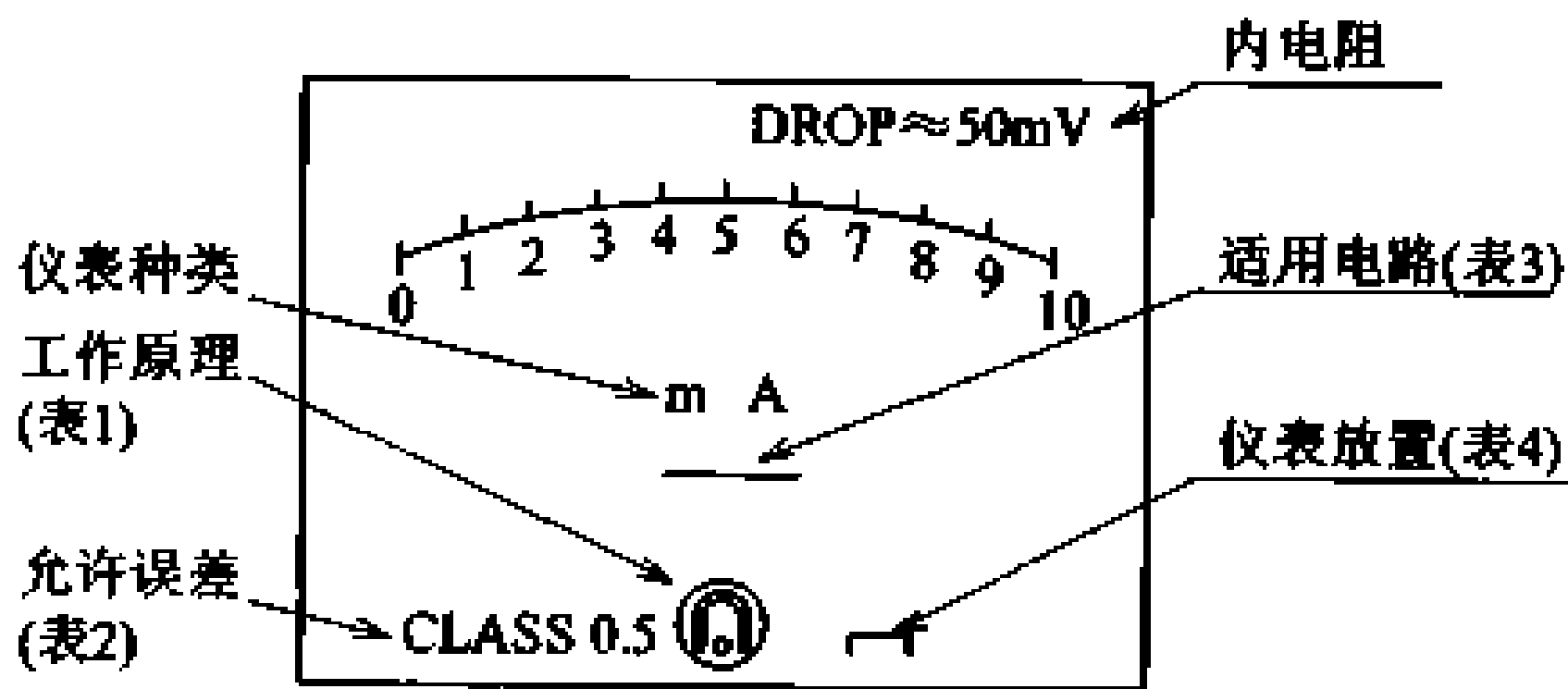


图 5.4 模拟仪表的面板

表 5.3 指针式仪表的容许误差

等级	允许误差[%]	主要用途
0.2	±0.2	辅助标准器,校正用
0.5	±0.5	精密级,工业用
1.0	±1.0	0.5级精密测量用
1.5	±1.5	一般测量用
2.5	±2.5	配电盘用

表 5.4 使用电路

电路	符号
直流用	—
交流用	~
交直两用	≈
平衡三相用	≡

表 5.5 仪表放置

放置方法(安装)	符号
垂直	⊥
水平	□
倾斜(60°)	∠60°

● 关于  $1000\Omega/V$  和  $DROP \approx 50mV$

$\Omega/V$  表示电压表的内阻,  $DROP \approx 50mV$  表示电流表的内阻。

如图 5.4 所示, 写在表盘右上角。

$1000\Omega/V$ : 表示接线端每  $1V$  电压为  $1000\Omega$ 。

当为  $5V$  接线端时, 内阻为  $1000 \times 5 = 5000\Omega$

$DROP \approx 50mV$ : 表示在  $50mV$  时的满刻度电流。由此可以通过计算求得内电阻。

当为  $300mA$  接线端时, 内阻为  $\frac{50mV}{300mA} \approx 0.167\Omega$

# 3 动圈式仪表

## □ 要点

作为指针式仪表的代替,动圈式仪表是利用永磁铁的磁通与流过线圈的电流的磁通相互作用而工作的。本节将学习动圈式仪表的特点,并利用它来学习模拟式万用表的知识。

## □ 解释

动圈式仪表

### ● 动圈式仪表的结构

动圈式仪表的结构示于图 5.5。当被测电流流过线圈时,线圈就会产生磁场,与永磁铁之间产生驱动转矩。这个驱动转矩使线圈转动,并稳定在与张力弹簧的控制转矩相平衡的位置。这时的指针偏转量与被测电流成正比。所以它的表盘刻度是均匀刻度。

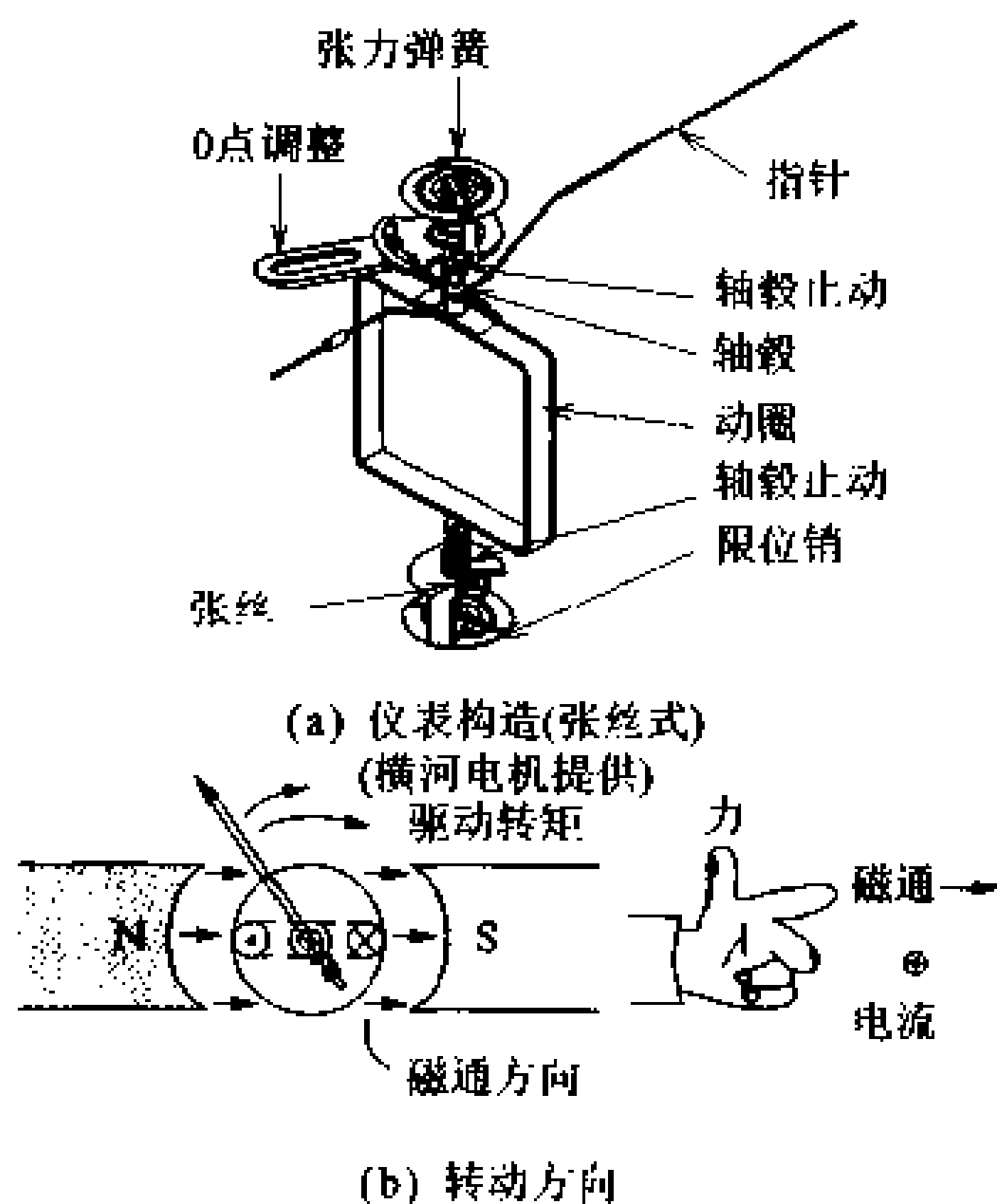


图 5.5 动圈式仪表

## □ 相关知识

万用表

电路表

### ● 模拟万用表的结构及使用方法

动圈式仪表中最常用的是万用表。图 5.6 为万用表的外观。它是一种可用一块表测量直流电压、直流电流、交流电压、电阻等参数的仪表,又称为电路表。从它的名称可以知道,它可用于电子线路检查等范围的测量。但由于仪表仅为 2.5 级,所以不适用于精密测量,不过用于线路检查已足够了。对于电气电子技术人员来

说,使用万用表就像医生使用听诊器一样。

万用表是由用于测量直流电压和交流电压的倍率器,测量直流电流所需的分流器以及测量交流电压和交流电流所需的二极管等零件组成的。

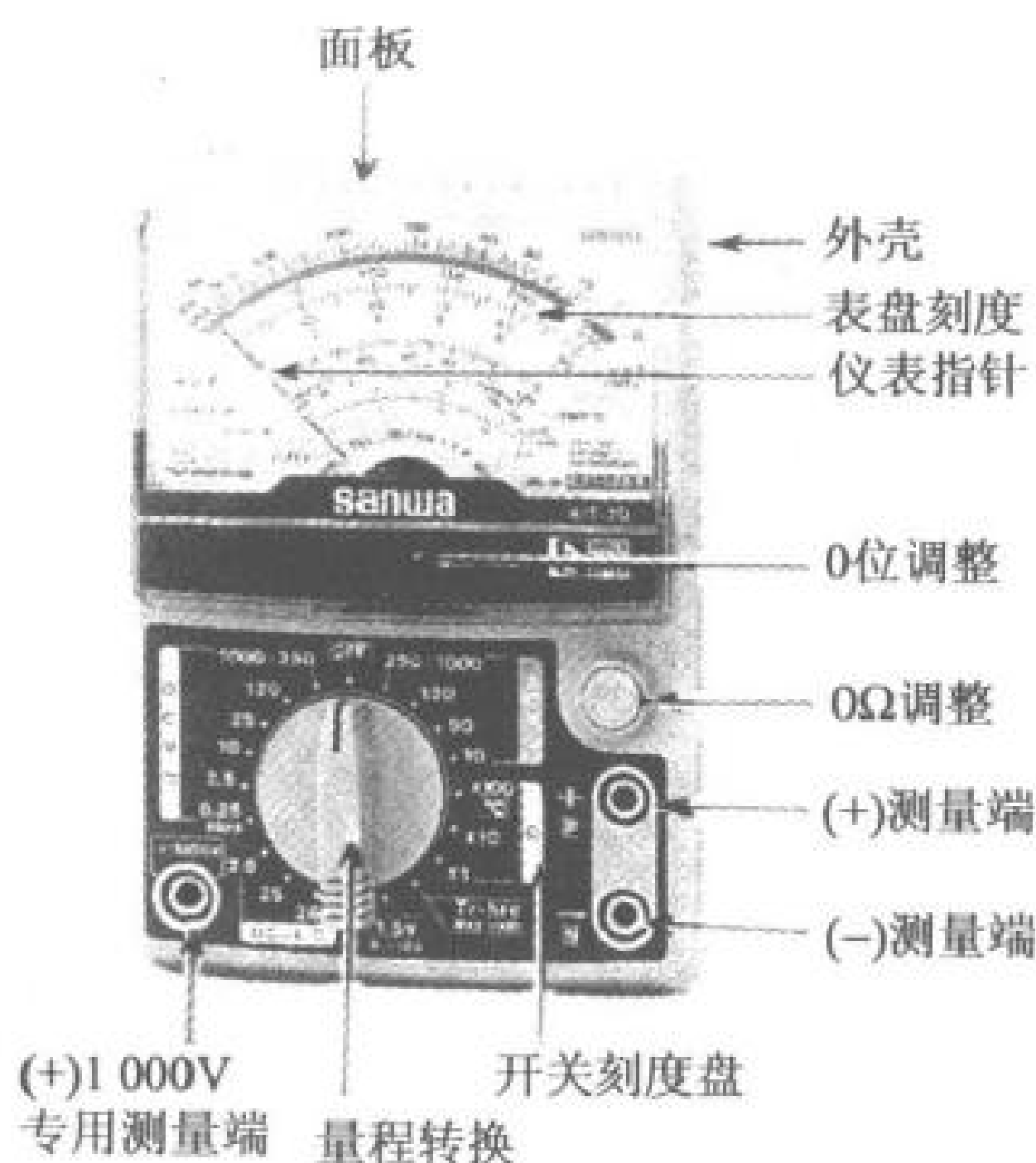


图 5.6 万用表的外形及各部分的名称

## 应用基础 使用方法

### ① 测量准备 仪表调零(机械调零)

使用万用表之前,用螺刀调节 0 位调整器使指针位置停在左端的零点。测量之前先看一下,如果正确则不需调整。如果零位不正常,所有的测量值均会出现误差,所以必须特别注意。

### ② 测量直流电压(DCV) (图 5.7)

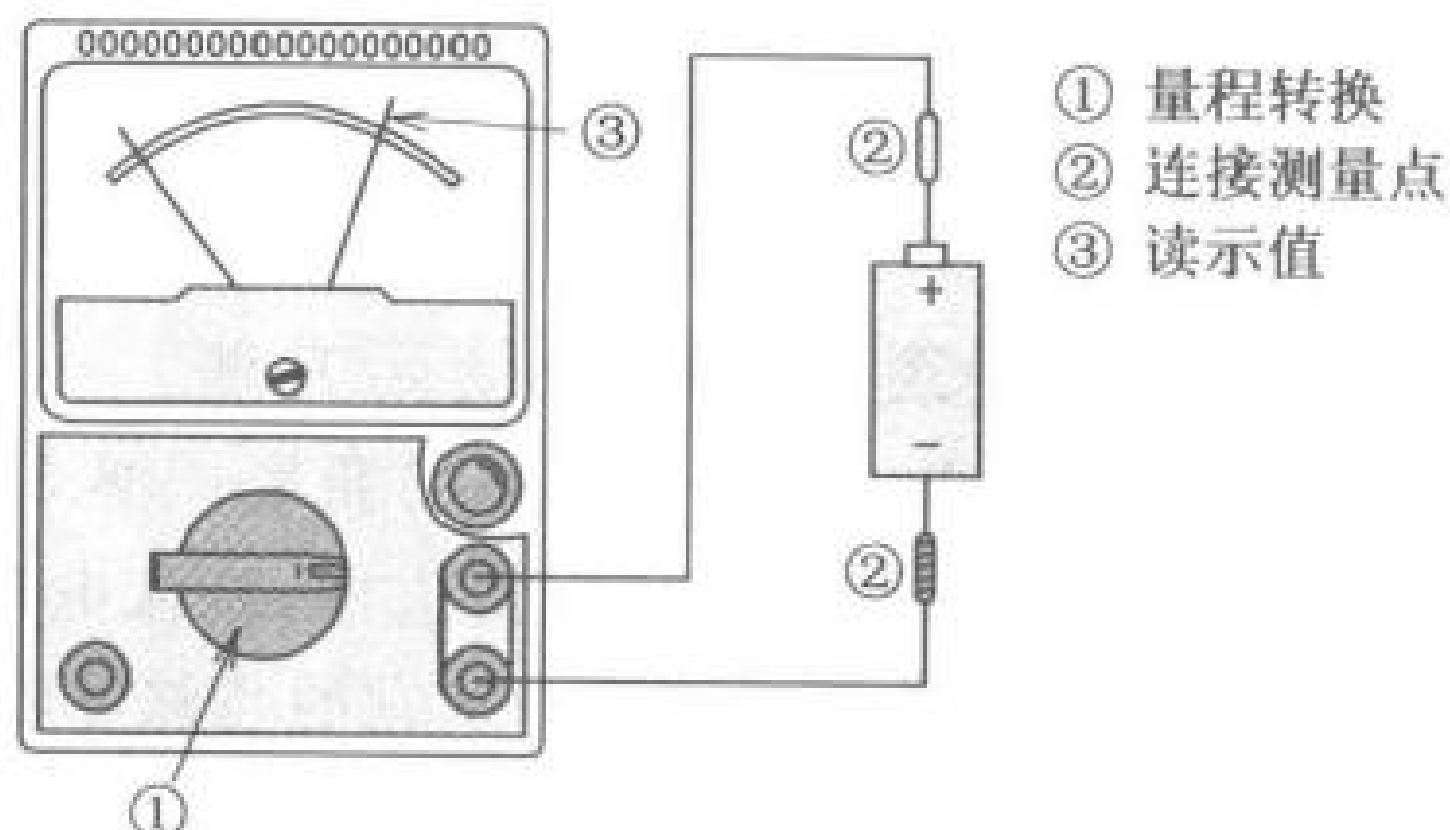


图 5.7 测量直流电压

测量直流电压时,万用表应与测量电路并联联接。由于是直流,所以应注意极性。

③ 测量电阻( $\Omega$ ) (图 5.8)

① **0 $\Omega$  调整(电气调零)** 首先将量程开关转换到电阻档,然后将测量线短接,调节调 0 $\Omega$  旋钮使指针指到右端的 0 $\Omega$  处。在重复进行测量或转换量程时,应每次都进行调零。如果调零旋钮向右转到底而不能使指针到达 0 $\Omega$  时,表明万用表内装电池耗尽,需更换新电池。

② **测量与注意事项** 调零后,将测量线与被测电阻的两端相连,读取电阻值。测量时,由于测量线的极性与内装电池的极性相反(红线为负极、黑线为正极),所以在用于测量二极管等器件时应特别注意。

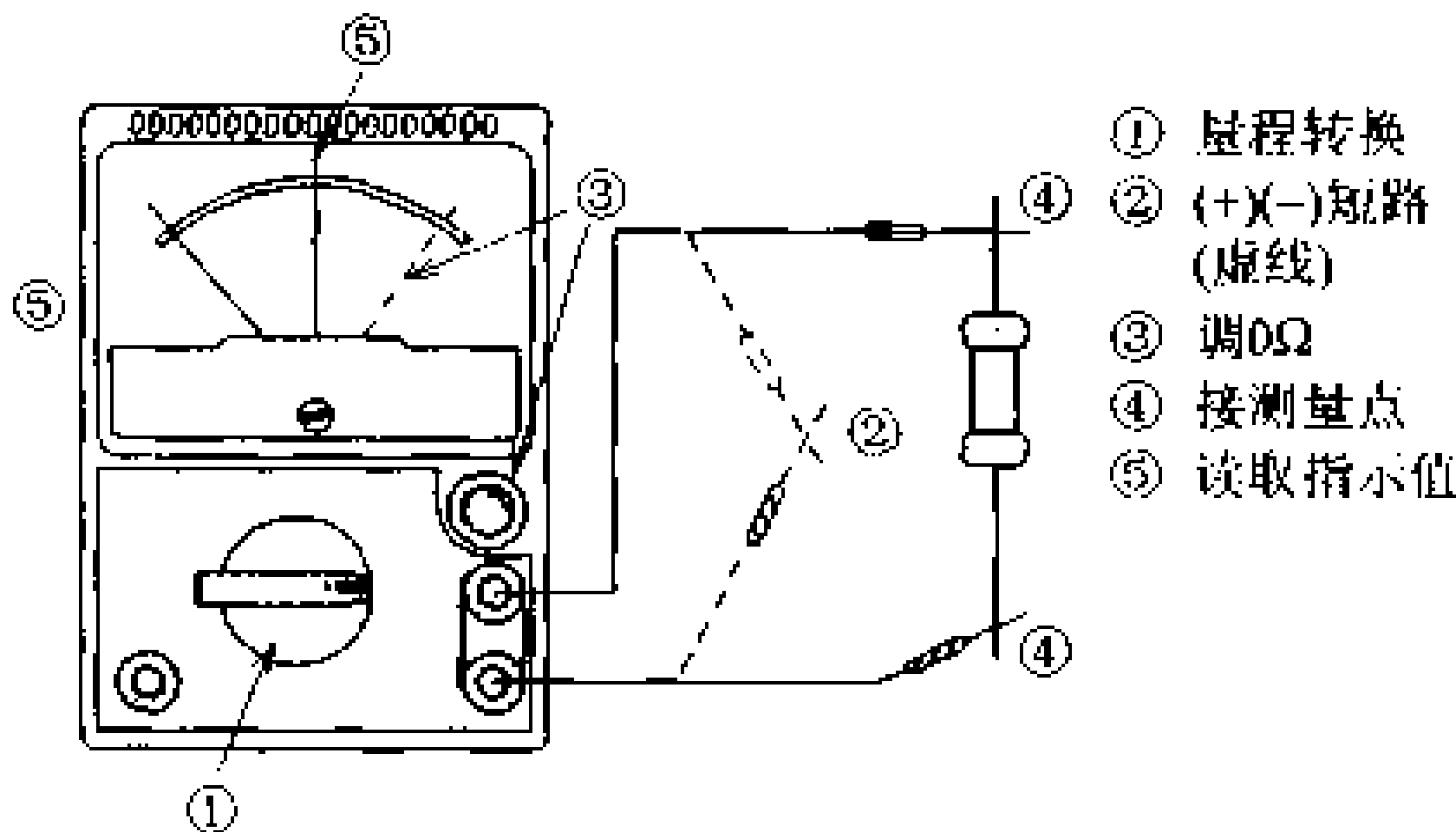


图 5.8 电阻的测量

## 4 数字万用表的结构

### □ 要点

数字万用表是万用表的一种,是一种便携式数字多用表(DMM)。测量范围为直流电压、直流电流、交流电压、交流电流以及电阻,由于它是用数字表示测量值,所以在读数时没有误差。本节将学习数字多用表以及它的结构和使用方法。

### □ 解释

#### ● 数字万用表

数字万用表的外观图及主要名称示于图 5.9。数字万用表直接用数字表示测量值,所以如果仪表有存储功能和输出端,即可以将数据读入微机,因而使数字仪表获得了迅速发展。由于用一台仪器可以测量电压、电流、功率、电阻等多种基本测量功能,故可以用于现场及实验室等多种场合的测量。其体积大小也是各种各样的,小到袖珍万用表,大到台式仪器。图 5.9 是袖珍型万用表。



图 5.9 数字万用表的外观及主要名称

#### ● 数字万用表的结构与使用方法

数字万用表的结构示于图 5.10。测量中通过转换量程开关联接于内部电路的各个部分。

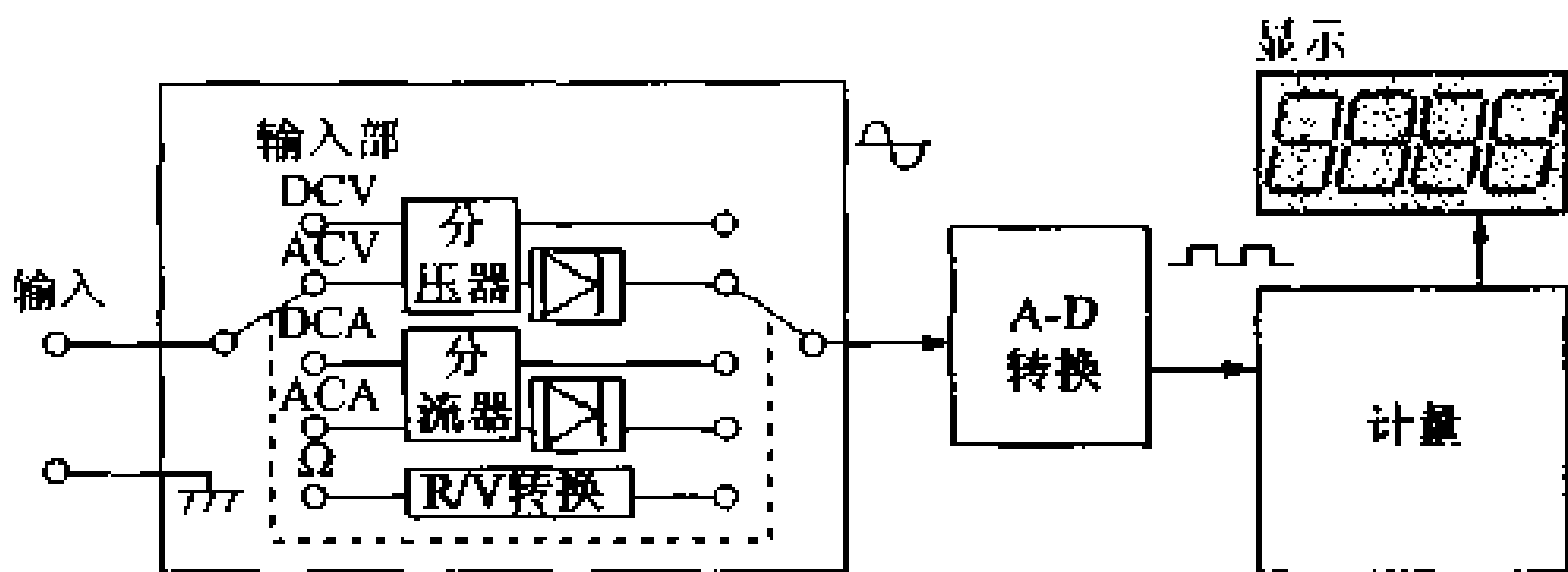
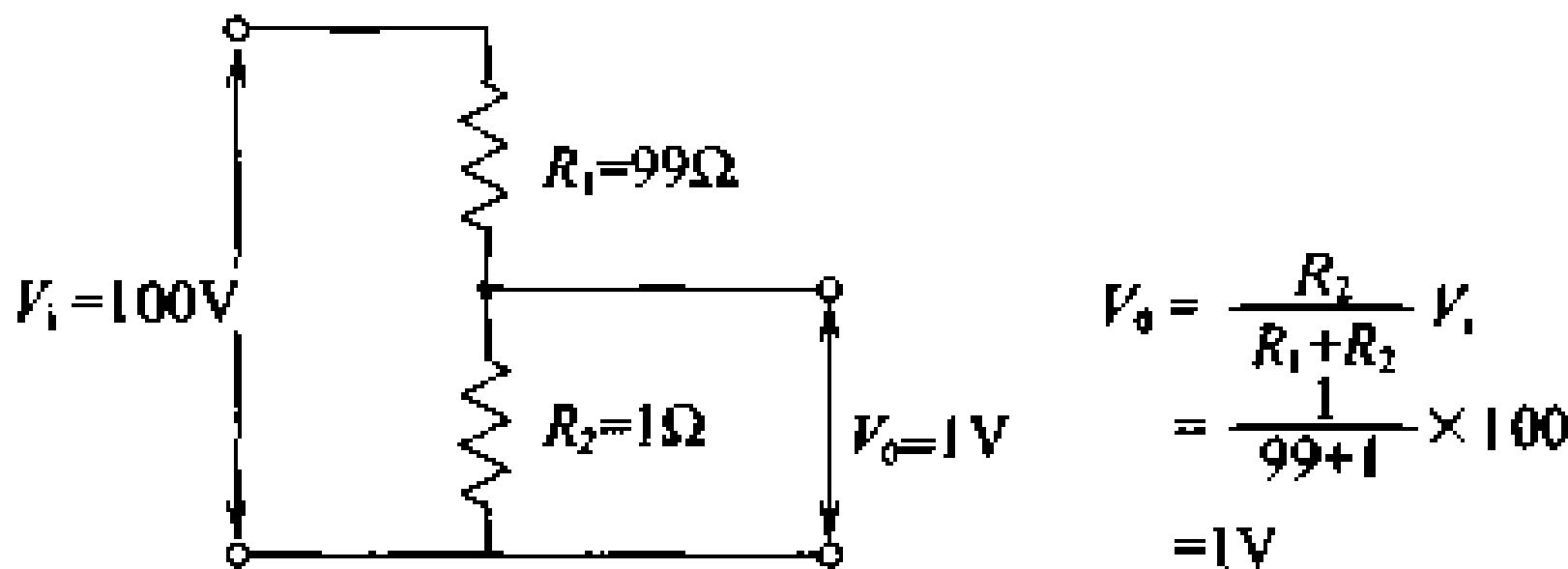


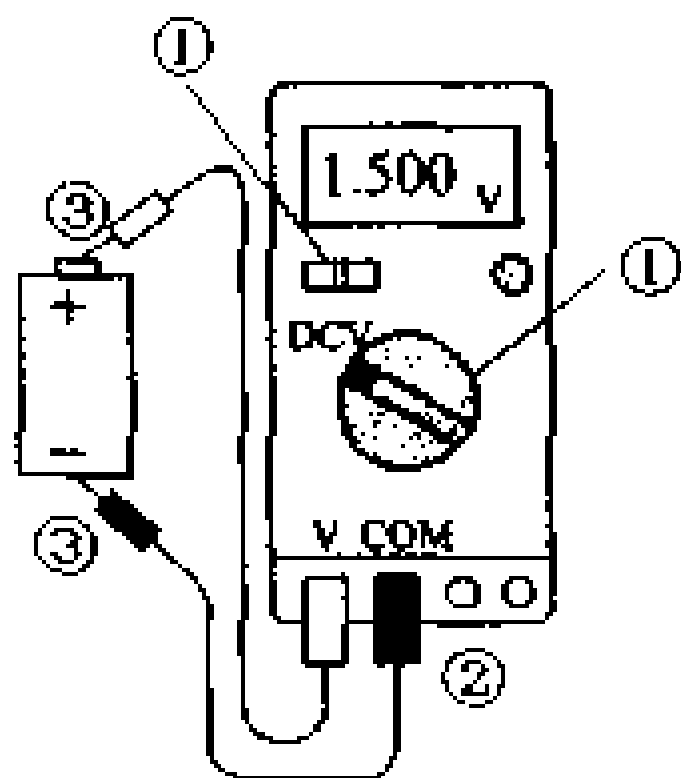
图 5.10 数字万用表的基本构造

● 直流/交流电压的测量

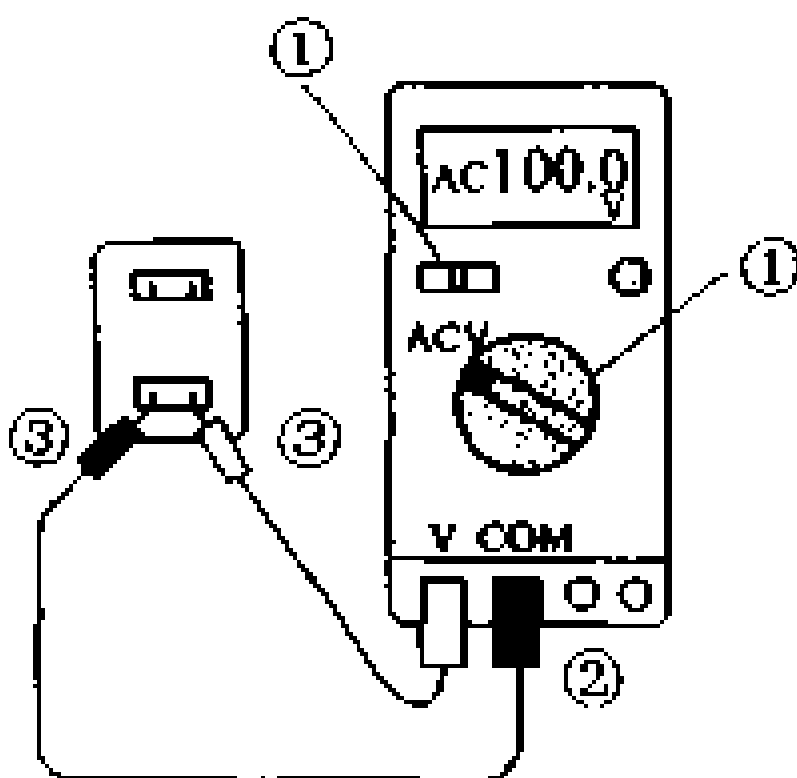
数字万用表可根据测量电压的大小自动选择合适的量程。量程由分压器来分割,分压器由不同的电阻构成,如图5.11(a)所示。测量交流时,用整流电路进行 AC-DC 转换。



(a) 分压原理



(b) 直流电压的测量



(c) 交流电压的测量

图 5.11 测量电压

测量直流的步骤如图 5.11(b) 所示,测量交流的步骤如图 5.11(c) 所示。由于是测量电压,所以测量时与电源并联。测量直流电压时还应注意正负极性。

- ① 打开电源,使量程旋钮转到“DCV”/“ACV”。

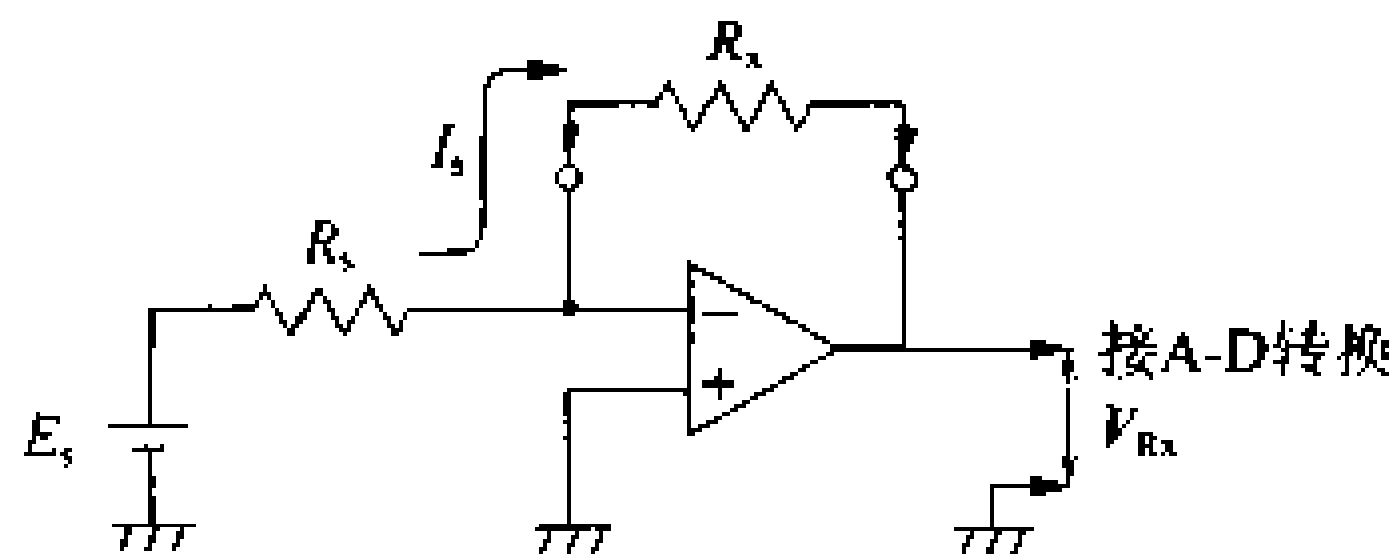


- ② 将黑色引线接“COM”，红色引线接“V”。
- ③ 将测量线的端部接被测电路，并读取测量值。

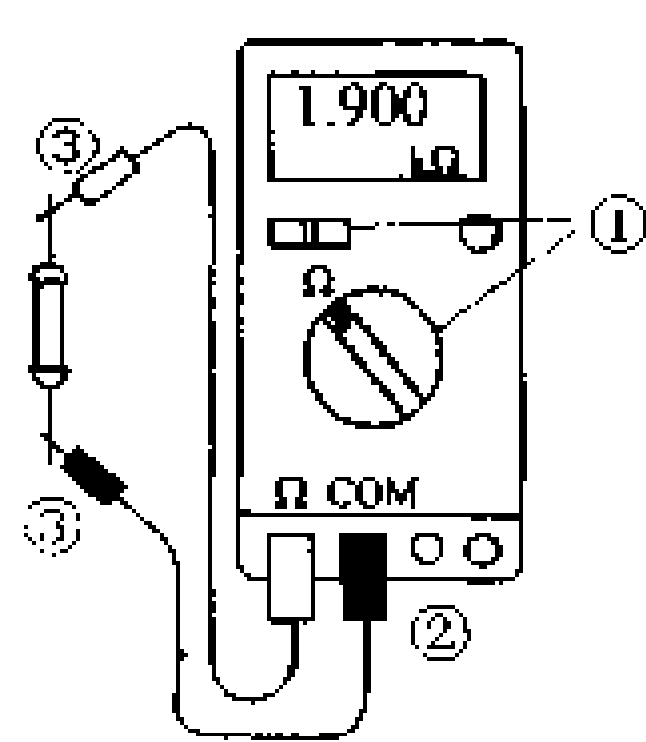
### ● 电阻的测量

电阻的测量如图 5.12 所示，它是以内装电池为电源，使电流流过被测电阻，通过测量电阻的端电压来计算求得电阻值。其测量步骤如图 5.12(b)、图 5.12(c) 所示。 $\Omega$  档除可测量电阻外，还可以用于检查线路是否导通或进行二极管等元件的检查。

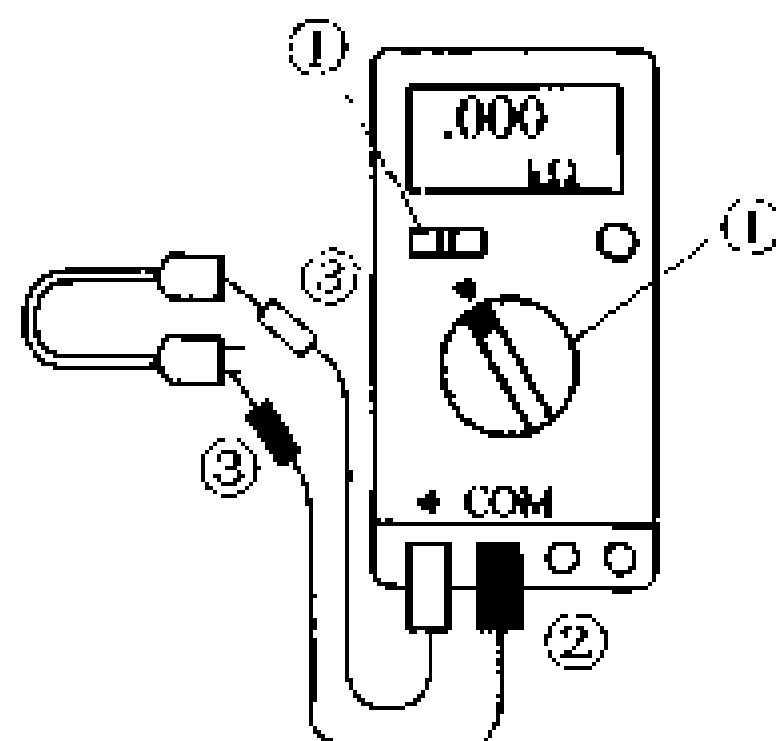
- ① 打开电源，将量程切换开关转到“ $\Omega$ ”档；
- ② 测量线的黑端接“COM”，红端接“ $\Omega$ ”；
- ③ 将测量线的端部接到被测电路，并读取测量值。



(a) 电阻表的原理



(b) 测量电阻



(c) 导通试验

图 5.12 电阻的测量

# 5 高频电流的性质与测量

□ 要 点

所谓高频是指频率约在 20000Hz 以上的信号。在高频段,由于出现诸如集肤效应等高频特有的性质,电路将会受到各种制约。

□ 解 释

● 高 频

交流信号包括很宽的范围,通常所说的高频是指频率高于音频的信号。音频范围为 20000Hz 以下,所以高于此频率的信号称为高频(图 5.13)。

高频  
音频

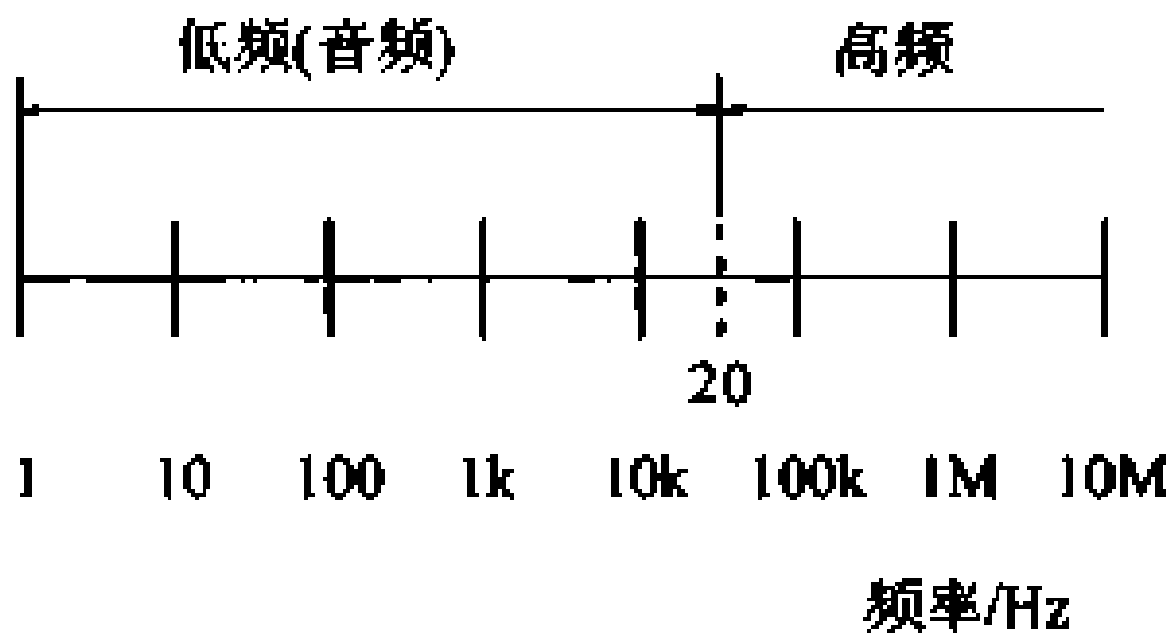


图 5.13 低频与高频

● 用热电式电流表测量高频电流

热电偶是一种不易受高频影响的元件。利用热电偶来测量电流的仪表即为热电式电流表。热电式电流表的外观示于图 5.14,接线图示于图 5.15。

热电偶  
热电式电流表

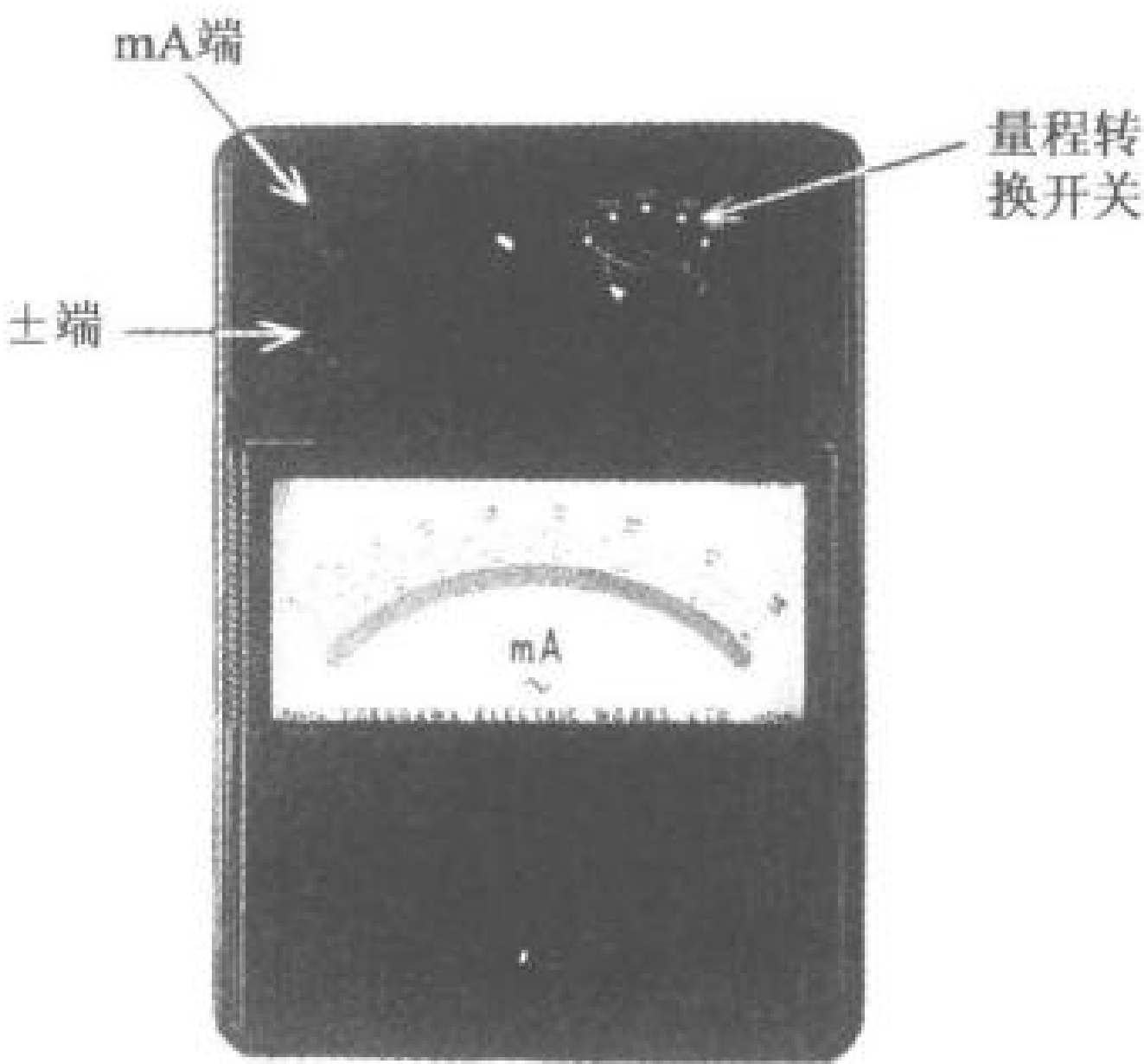


图 5.14 热电式电流表的外观

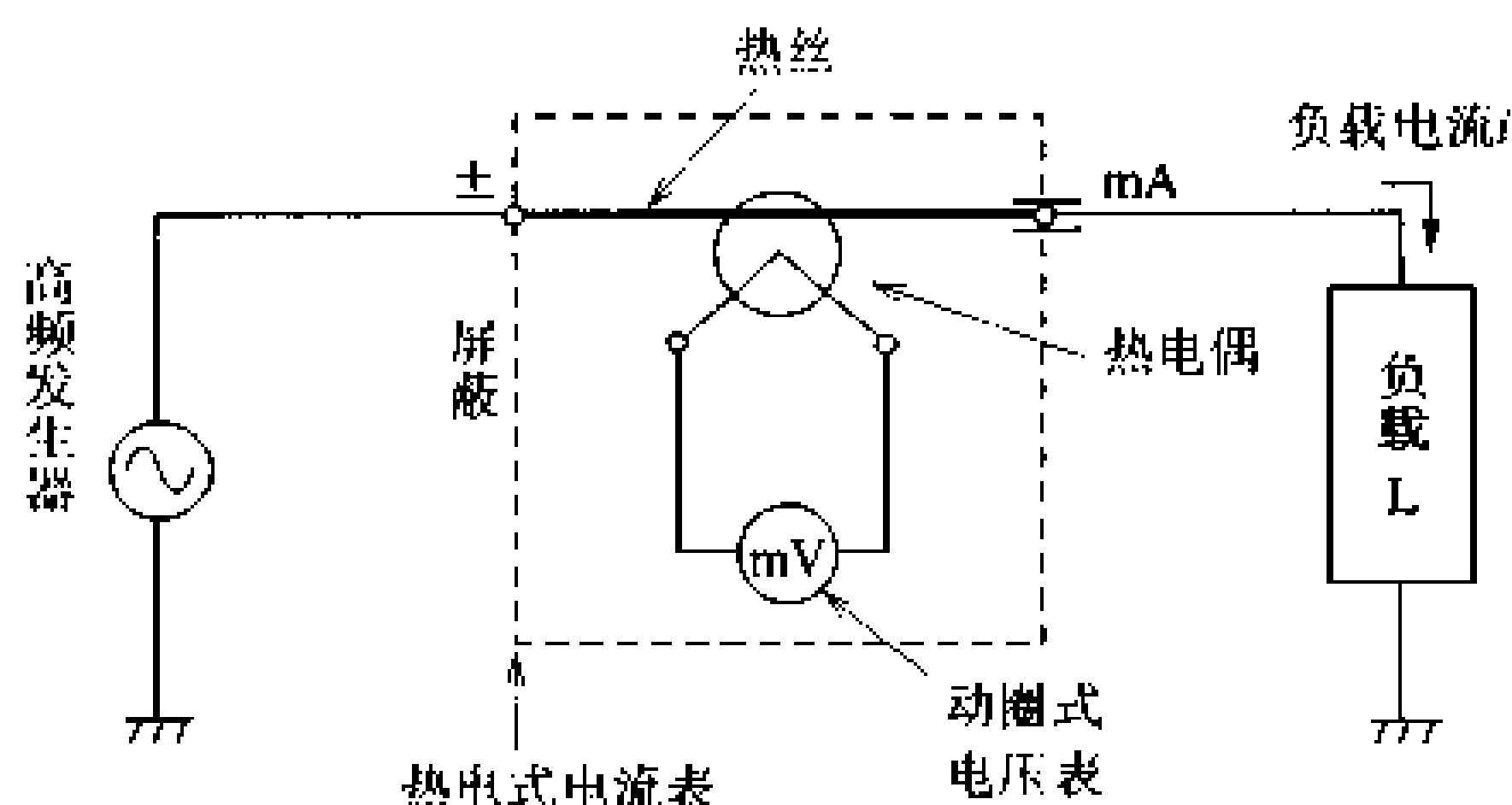


图 5.15 用热电式电流表测量高频电流

这种仪表是热电偶和动圈式仪表的组合。被测电流流过热丝,热电偶把温度的变化变成热电势,用动圈式仪表进行测量。热电式电流表的特点及注意事项如下:

- ① 由于是热量的转换,所以指示值为有效值。
- ② 0.5 级仪表测量频率可达 5MHz,1.0 级仪表可达 7MHz。
- ③ 温度的升高与电流的平方成正比,所以电流表表盘刻度为平方刻度。
- ④ 为防止热电偶损坏,测量量程应预置在“短路”档 (SHORT),再缓慢地转到小数值档。
- ⑤ 因为用热电偶转换电流,所以指针变化速度缓慢。注意不应着急,等一会再读取数据。
- ⑥ 该电流表是全屏蔽式,测量端标有“+”的为屏蔽端。因而接入负载时必须接到“mA”端上。不然,会受到杂散电容的影响而损坏热电偶。

## □ 相关知识 ● 集肤效应

与直流相比,频率越高则导体的电阻值越大,这是集肤效应的影响。集肤效应就是频率越高,电流越向导体的表层集中,而导体的中心却少有电流流过。由于集肤效应,通过电流的有效截面积减少,电阻值增大(图 5.16)。

## ● 剩余阻抗

在高频电路中,即使是一根导线也存在电阻和电感,使导线的周围产生磁通。频率越高,它对电路的影响也越大,成为剩余阻抗或杂散电感(图 5.17)。

剩余阻抗  
杂散电感

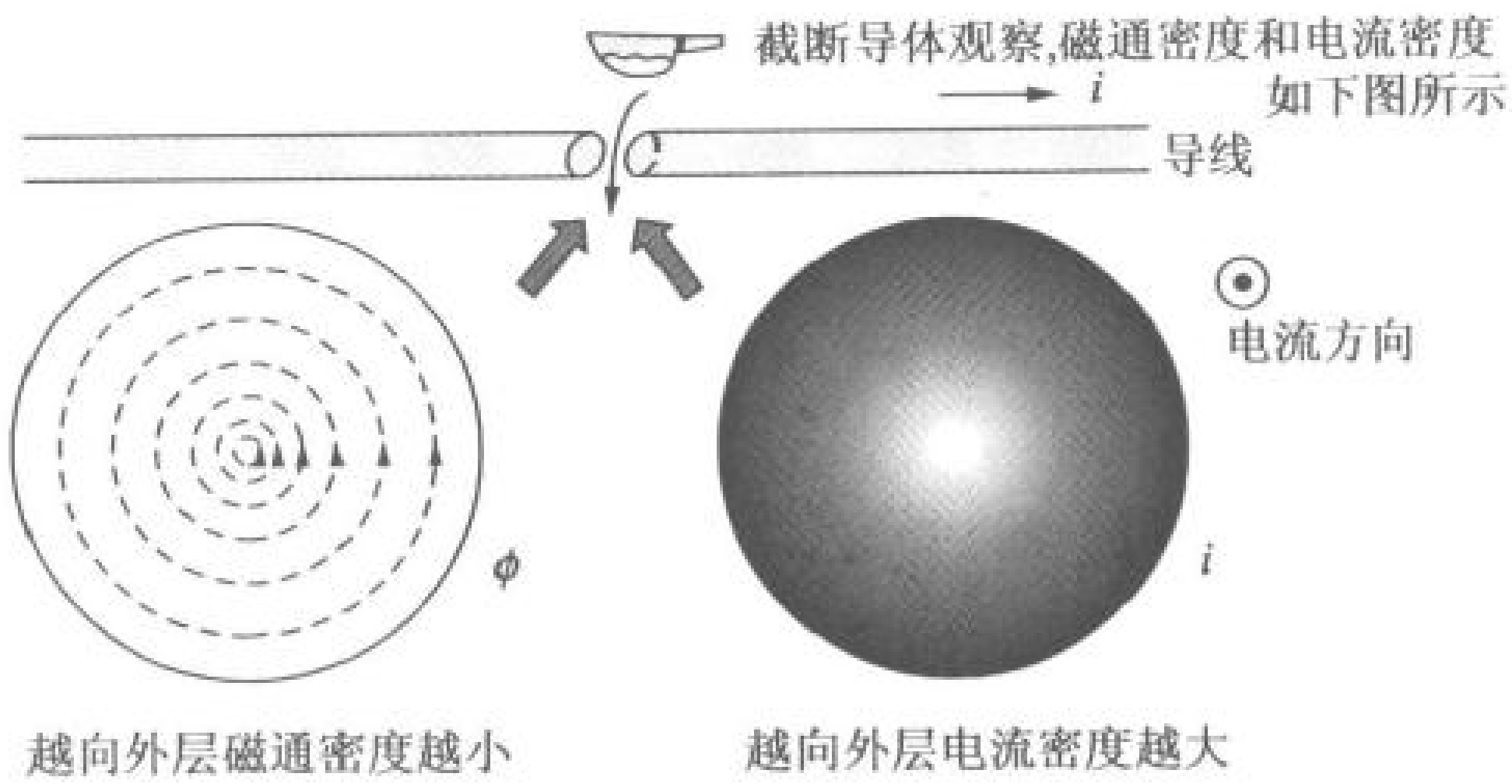


图 5.16 集肤效应

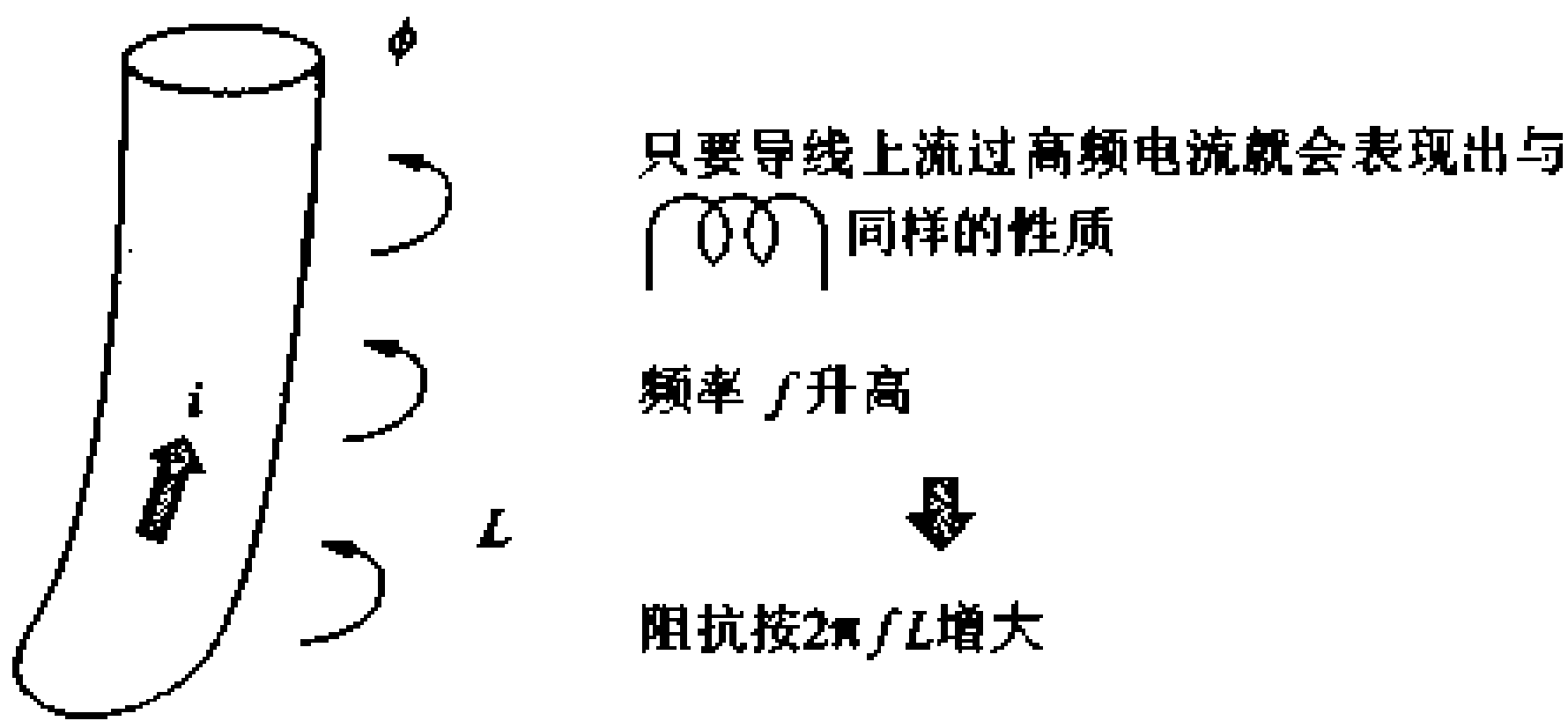


图 5.17 剩余阻抗

## 6 电子电压表

### □ 要点

为了在高频电路中测量电压,就必须具有高的输入阻抗,以防止对电路条件产生影响。还必须能测量微小的电压。电子电压表可以满足这些条件,可以用在高频下的高电压测量。

### □ 解释

#### ● 电子电压表的结构

#### 电子电压表

图 5.18 为电子电压表的外观,图 5.19 为其电路图。交流电压表有二种类型,一种为整流型,它是先将交流电压进行检波、整流,再将直流信号放大后进入动圈式仪表来完成测量的。另一种为交流高灵敏度型,它是将输入信号首先进行交流放大,然后经检波再送入动圈式仪表来测量。测量规格随装置而异,大致测量范围列于表 5.6。



图 5.18 电子电压表的外观

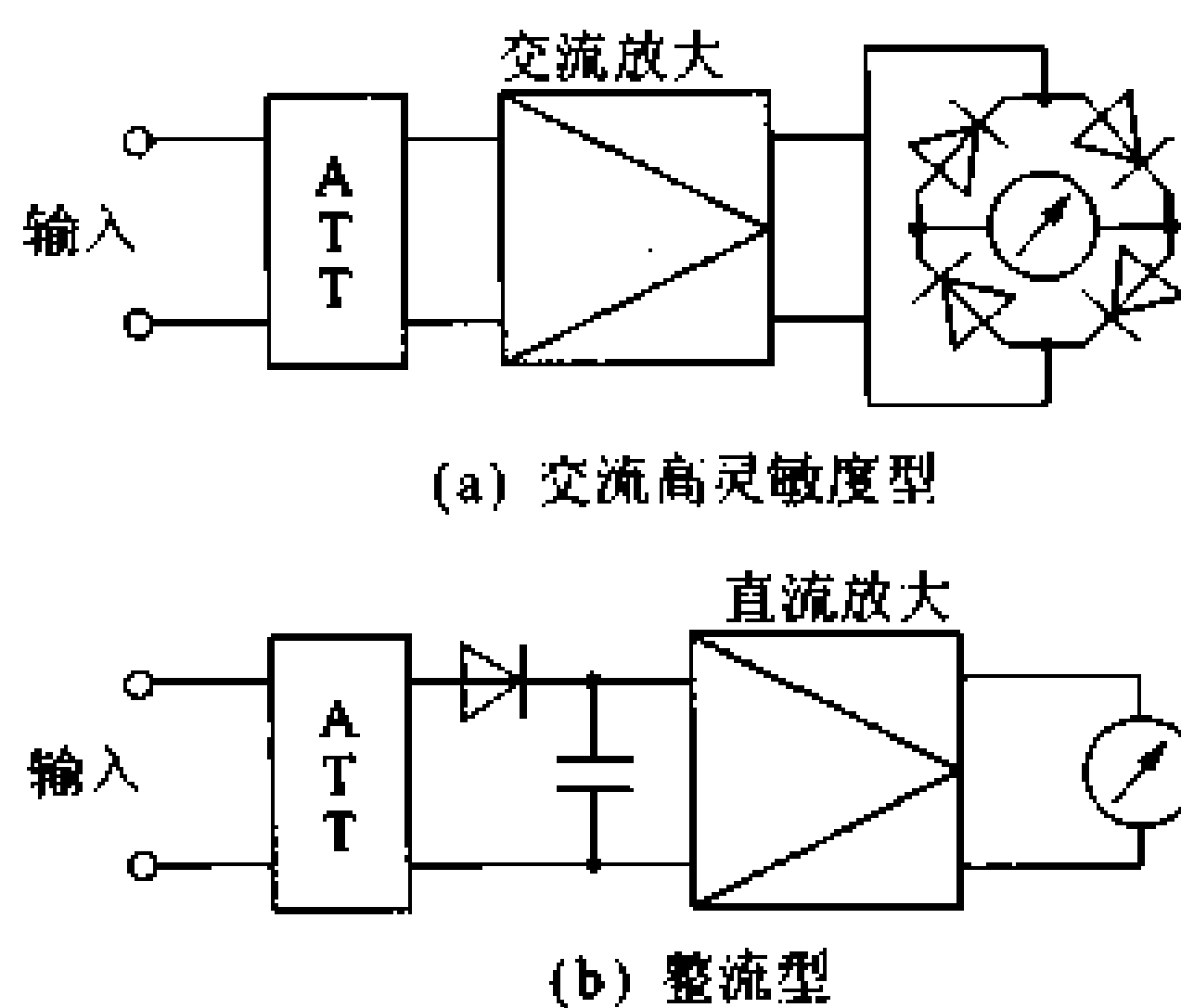


图 5.19 电子电压表的电路图

表 5.6 电子电压表的主要测量范围

项 目	测 量 范 围
测量频率	5Hz~10MHz
测量电压	300μV~500V
(12 个量程)	-70~40dB
输入阻抗	1~10MΩ 以上
指示精度	满量程的±1.5%~3.0%
放大器增益	约 60~70dB
输出阻抗	600Ω
指示值	平均值指示/有效值指示
输入通道	1 通道/2 通道

峰值  
峰值(P型)电  
子电压表

另外,还有指示峰值的电子电压表。这种电子电压表称为**峰值(P型)电子电压表**。

□ 相关知识

电压增益  
功率增益  
dBV

● 分贝(dB)

分贝是表示**电压增益**或**功率增益**所使用的单位。用分贝作为单位表示的放大量或衰减量是个相对值,它有利于把测量值与别的值进行比较。电子电压表的**dBV**刻度是以1V作为0dB将测量值对1V的倍数按dB数来标刻的。例如,输入1V得到100V输出,则100V为1V的100倍。将它代入电压增益公式,即为

$$G_v=20\lg \frac{e_o}{e_i}=20\lg \frac{100}{1}=40\text{dBV}$$

dBm

电子电压表的**dBm**刻度是在输出阻抗为600Ω时,以消耗的功率为1mW,即电压为0.775V为基准电平0dB来标刻度的。例如,某个测量值为77.5mV,则其衰减量为1/10,代入电压增益公式则可得到

$$G_v=20\lg \frac{e_o}{e_i}=20\lg \frac{0.0775}{0.775}=-20\text{dBm}$$

用电子电压表进行测量,并不需要进行以上计算,而是直接读出增益数值。

## 应用知识 放大电路频率特性的测量

测量频率特性的接线方式如图 5.20 所示。这是一个双通道式电子电压表的例子，可以同时测量 L 和 R 两个通道的信号。图中所示为采用“GND”模式测量。但有时由于放大器输出端的原因，电子电压表无法与 L 和 R 的“地”端连接。这时可采用“断开”（OPEN）方式，用导线将电子电压表和放大器的“地”端连接起来。

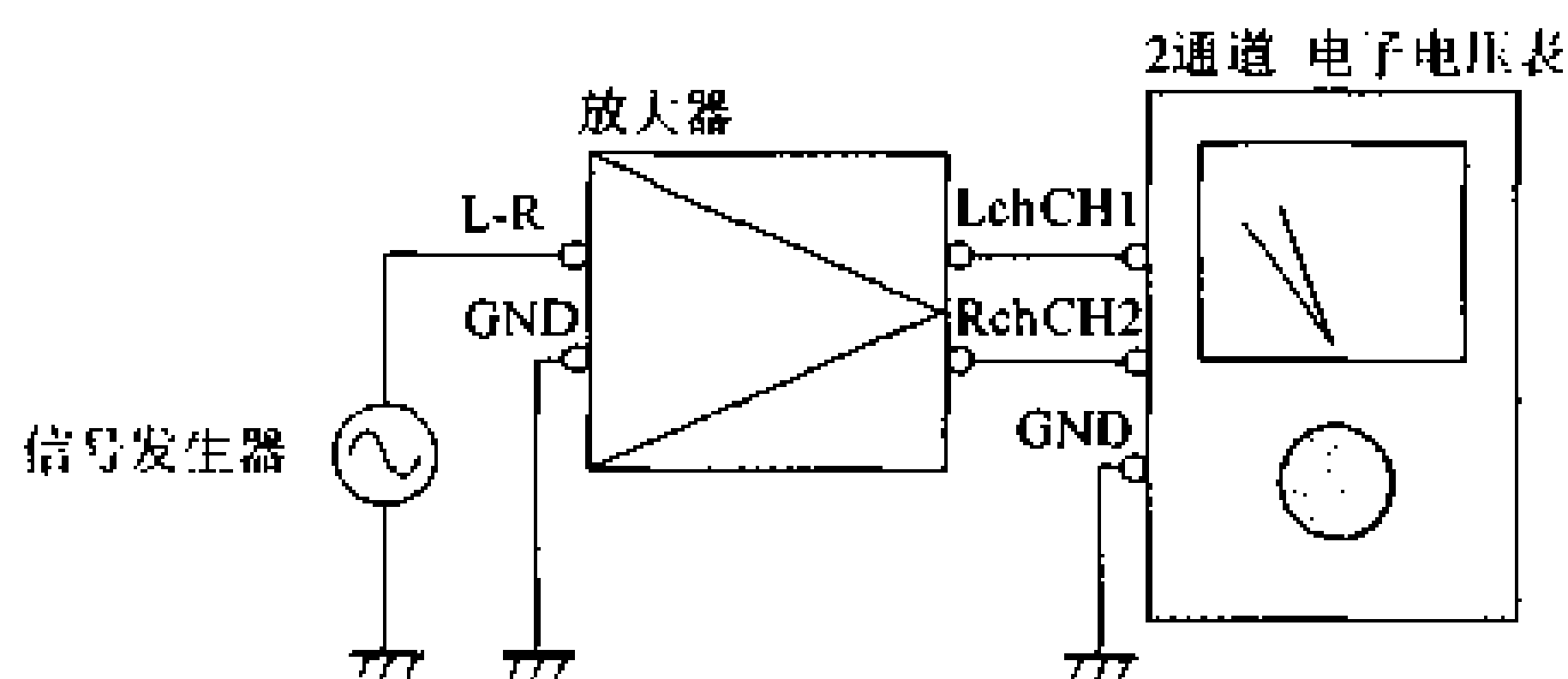


图 5.20 放大器增益的测量

## 7 数字频率计

### □ 要 点

数字频率计是测量交流信号频率的仪器。由于脉冲电路和数字电路的发展,已经有了测量精度高、可测高达微波段频率的数字频率计。此外还有许多既能测量频率又能测量周期和时间间隔的通用频率计。本节介绍数字频率计的构造与测量方法。

### □ 解 释

频率

### 释 ● 数字频率计的构造

频率是单位时间(1秒)内信号周期性重复的次数。频率计能产生脉宽为单位时间(1秒)的标准信号,并对该单位时间内波形的重复次数进行计数后,用LED显示成数字。

图5.21是数字频率计的外观,图5.22(a)、(b)为它的电路框图及各部分的波形。当输入端加上被测信号时,ATT对信号进行限幅,然后经过放大和整形,送入主门电路。此时的整形可采用第4.4节学过的施密特触发电路进行脉冲转换,使得主门计数电路正确地工作。

施密特触发  
电路

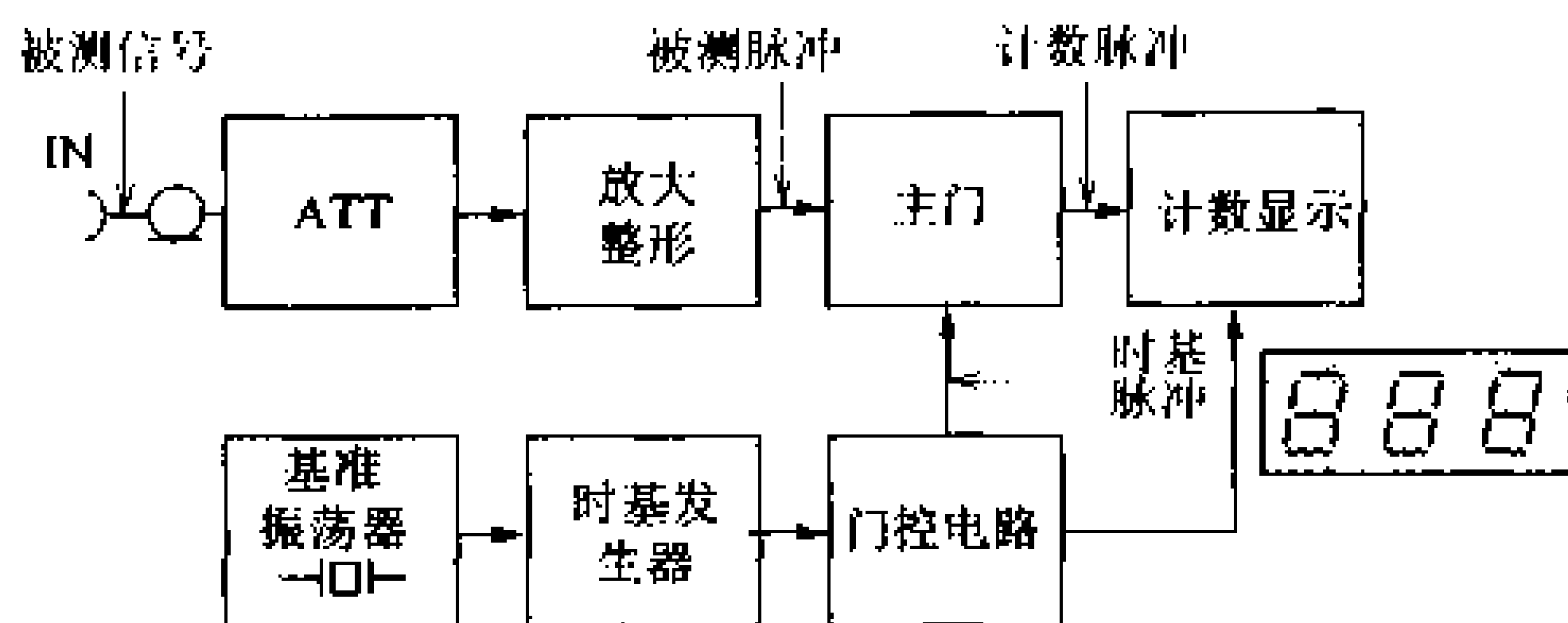


图 5.21 数字频率计的外观

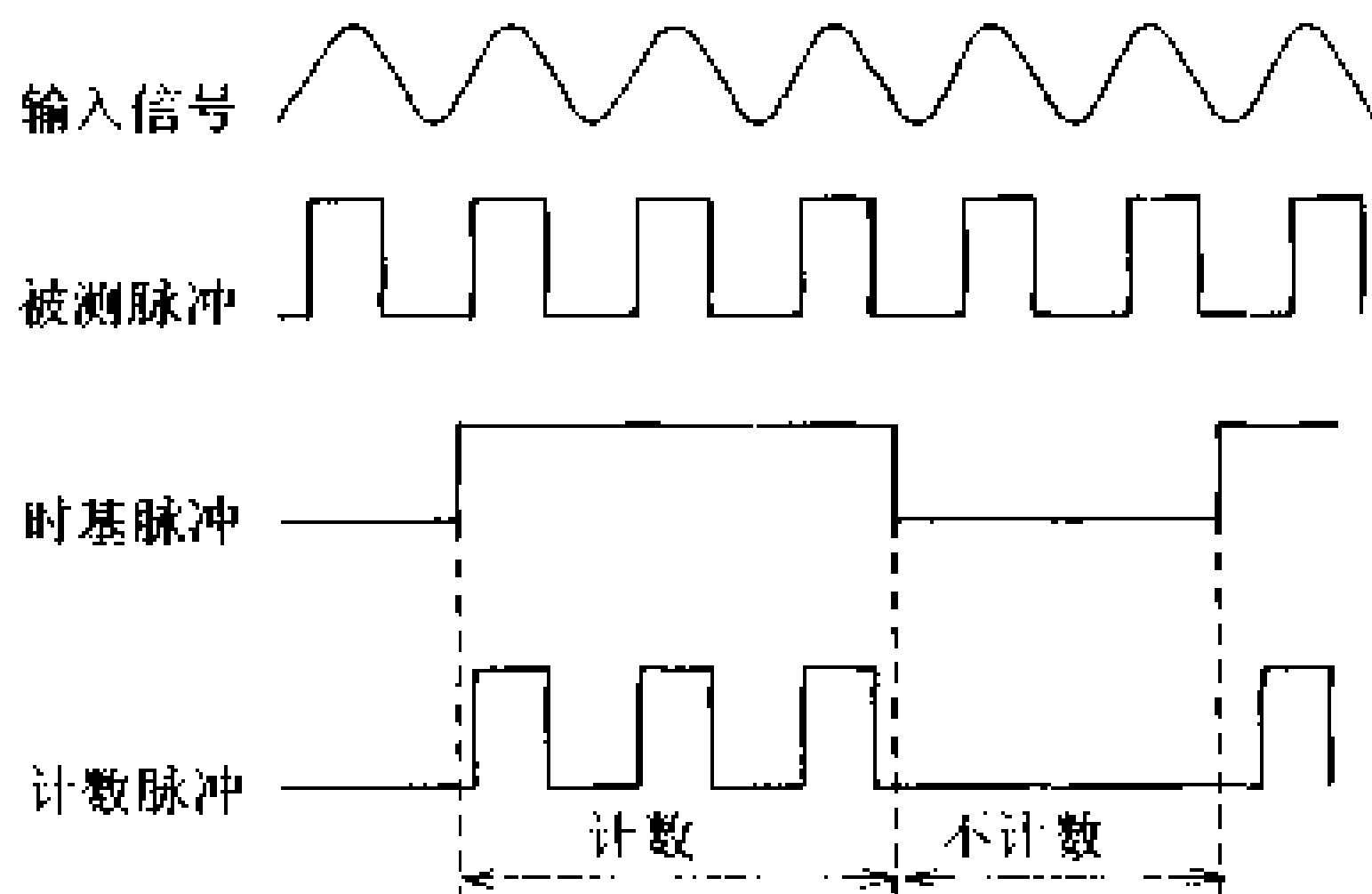
另一方面,基准电路所产生的信号,按照1ms、1s等若干不同的标准脉宽进行分频,分频比为1/10,然后送入门控电路。该电路是影响数字频率计性能的关键电路之一,它产生标准的门控时间,一般都采用晶体振荡器。不同装置使用的晶体有10MHz、1MHz、100kHz等多种。门控电路是控制门电路开闭的计时电路。此外,门控电路还具有送入门信号之前使计数电路复位和保持计数显示时间的功能。

下面再来看主门电路。该电路只允许被测信号在主门打开的时间内(例如1s)通过,并送入计数显示电路。计数显示电路对从门电路送来的信号进行计数后加到7段数码显示管LED进行显示。





(a) 基本电路构成



(b) 输出波形

图 5.22 数字频率计

### ● 数字频率计的误差

如果采用稳定的标准振荡器，频率计的测量结果应是非常准确的。但是，门脉冲与被测信号间的相位差，有时会造成 1 个计数误差。如图 5.23 所示，信号 A 的计数结果为 4，而信号 B 的计数结果为 5，后者比前者多出 1 个。

1 个计数误差

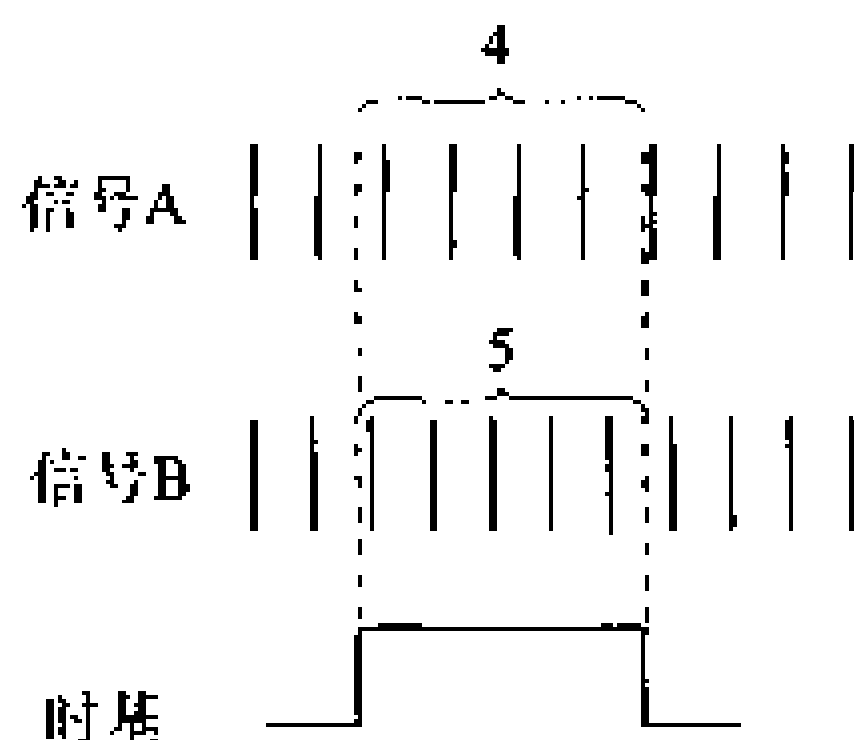


图 5.23 计数误差

# 8 信号发生器

## □ 要 点

信号发生器是用作电子设备调试的信号源,它能产生三角波、正弦波、方波等多种波形,广泛应用于从音频到高频的各种电子设备。其电路方式很多,既有迄今仍在使用的模拟式,也有利用数字技术的合成器方式。

## □ 解 释

### ● 信号发生器

信号发生器是一种可输出正弦波、三角波、方波、斜角波、脉冲波等多种波形,并有触发和门控功能的多用信号源。也是一种信号频率、振幅、偏置电压、相位、占空比等参数可任意设定的振荡器。

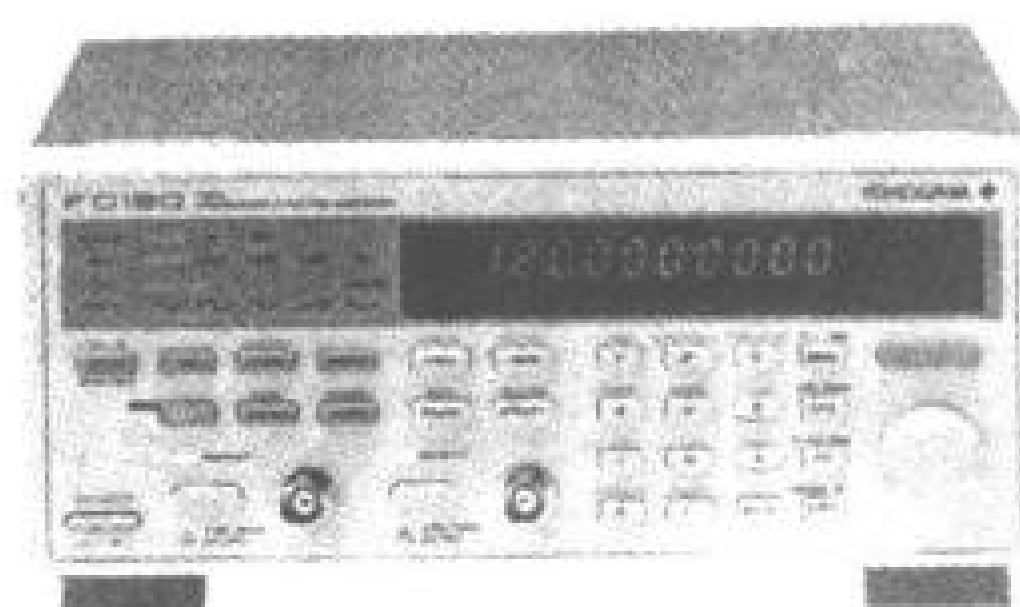
触发 门控功能

模拟式 锁相式  
数字式

信号发生器大致可分为模拟式、锁相式、数字式等三种。图 5.24(a)、(b)为模拟式和数字式信号发生器的外观。



(a) 模拟式



(b) 数字式

图 5.24 信号发生器的外观

### ● 数字式信号发生器

图 5.25 为信号发生器的基本电路构成。它的工作原理是,首先 CPU 使时钟停止振荡,把需要输出的波形(正弦波或三角波)写入波形存储器。然后启动时钟并使 DDS 工作,即可输出预先设定频率的波形。在输出方波的情况下,方波比较电路将正弦波变成方波,同时还同步地输出其它各种波形。所需的波形和振幅由输出电路设定,并从 OUTPUT 端输出。

### ● DDS

DDS(direct digital synthesizer)是指直接数字合成振荡器。如图 5.25 所示,它由地址运算器、波形存储器、D-A 转换器等部分组

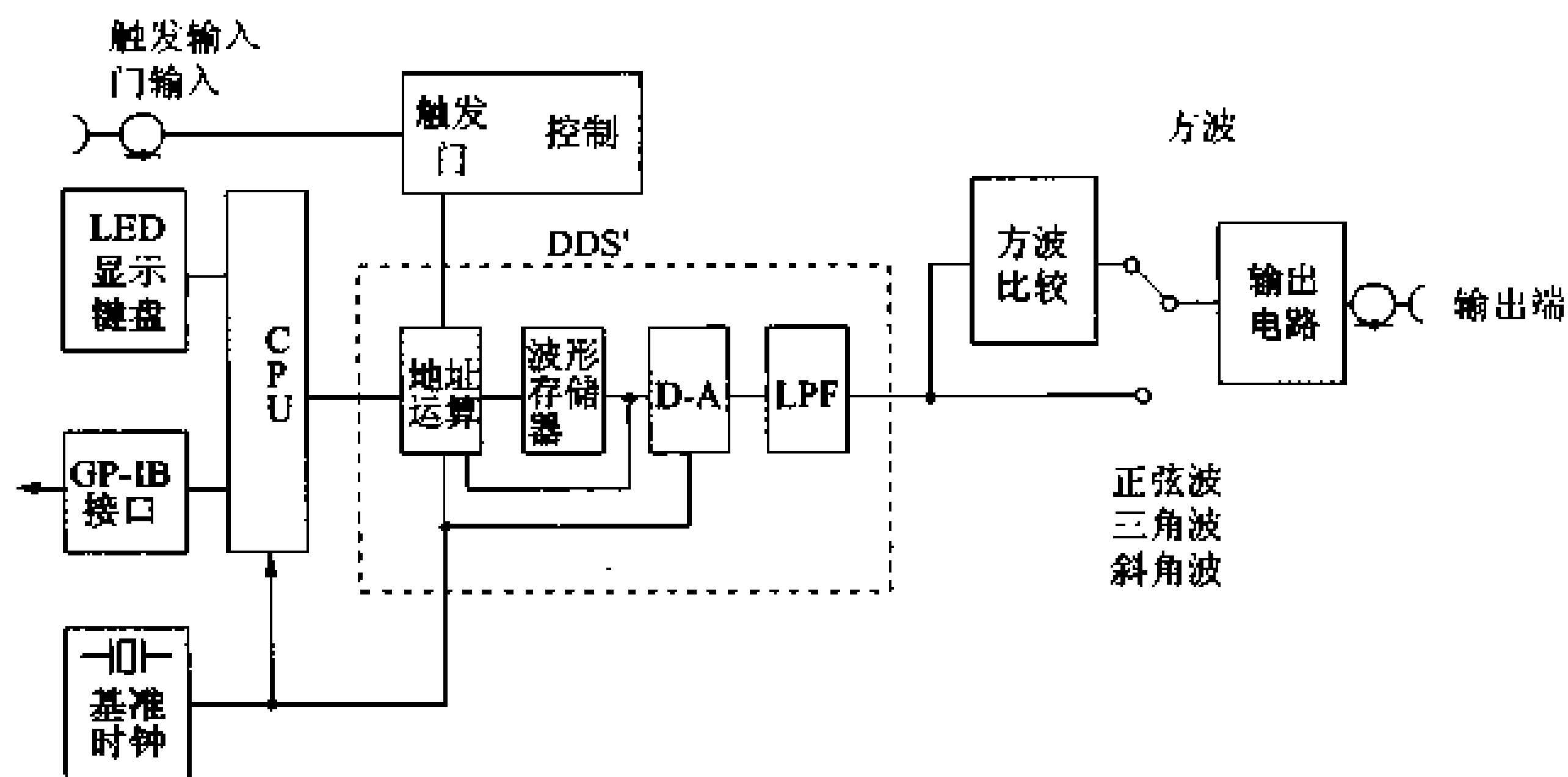


图 5.25 数字信号发生器

成。如将基准时钟输入到地址运算器,地址输出信号便进入波形存储器。由于波形存储器中记忆了 1 个周期的波形,所以波形存储器的地址就是波形的相位。波形存储中的数据按基准时钟同步调出后,经 D/A 转换器和 LPF(低通滤波器)转换成模拟波形后输出。

### ● 使用信号发生器的注意事项

① 输出端的阻抗为  $50\Omega$ 。为了使仪器既可用于低频也能用于高频,所以输出端必须使用同轴电缆(图 5.26)。

② 由于受输出电压定义和负载的影响,当输出阻抗定为  $50\Omega$  时,如果外接高阻负载,则输出电压将升高到 2 倍。

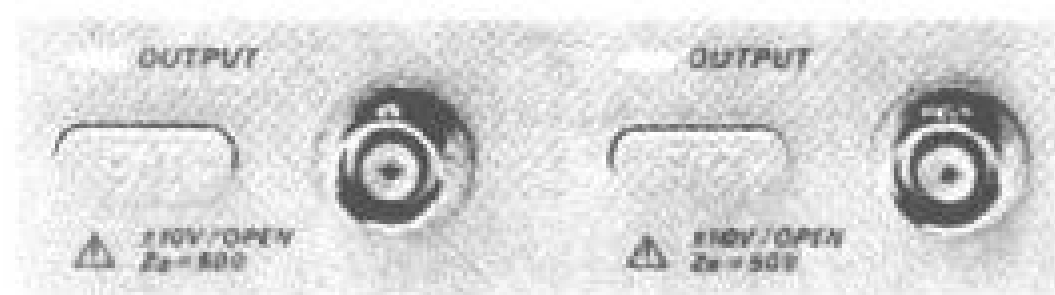


图 5.26 输出端

## 9 示波器

### □ 要点

示波器是观测电信号波形与振荡的仪器。它能从直流到很宽的频带内观测信号波形,同时还可以测量周期、频率、电压等参数。示波器有阴极射线管示波器和数字示波器两类,可根据不同用途来选用。

### □ 解释

垂直偏转板  
水平偏转板  
电子枪  
电子束

#### 释 ● 阴极射线示波器

图 5.27 为阴极射线管(CRT;cathod-ray tube)示波器的外观,图 5.28 为所显示的波形。现在来看它的工作原理。由于垂直偏转板和水平偏转板上电压所产生的静电力的作用,使 CRT 电子枪发射的电子束(阴极射线)发生偏转,当碰到荧光屏时,使其发光。图 5.28(a)中,如只在垂直偏转板上加正弦波信号(被测信号),电子束只能作纵向摆动,屏上只显示一条纵向直线。如果同时在水平偏转板上加上锯齿波信号,使之产生水平方向的偏转,则示波器上就会显示出正弦波信号的波形,如图 5.28(b)所示。水平偏转板上所加的锯齿波信号称为扫描信号。当扫描信号与被测信号的周期成整数倍时(图 5.29),示波屏上可观察到好像是静止的波形。扫描与被测信号的同步可由改变扫描信号的周期来达到。

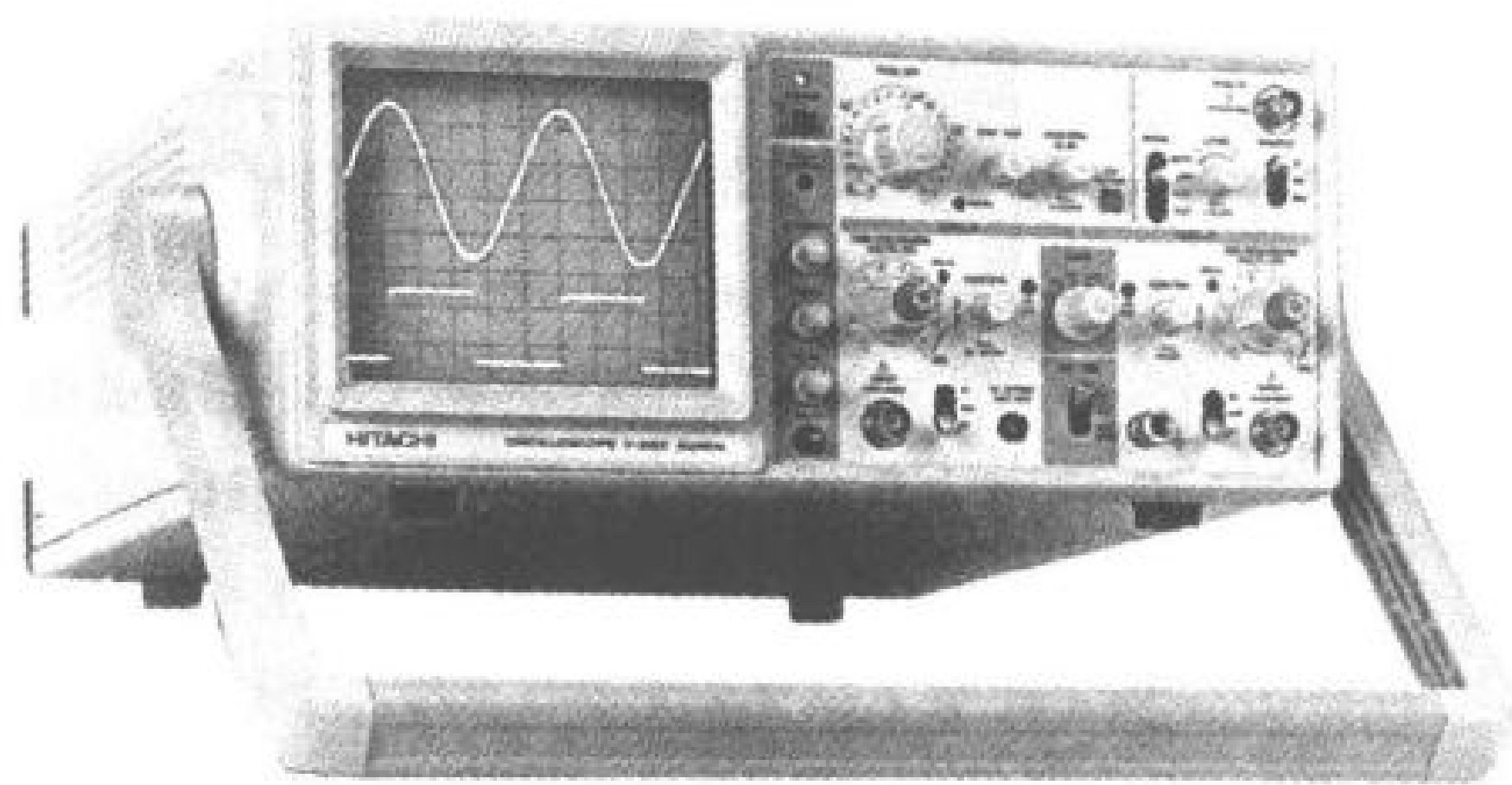
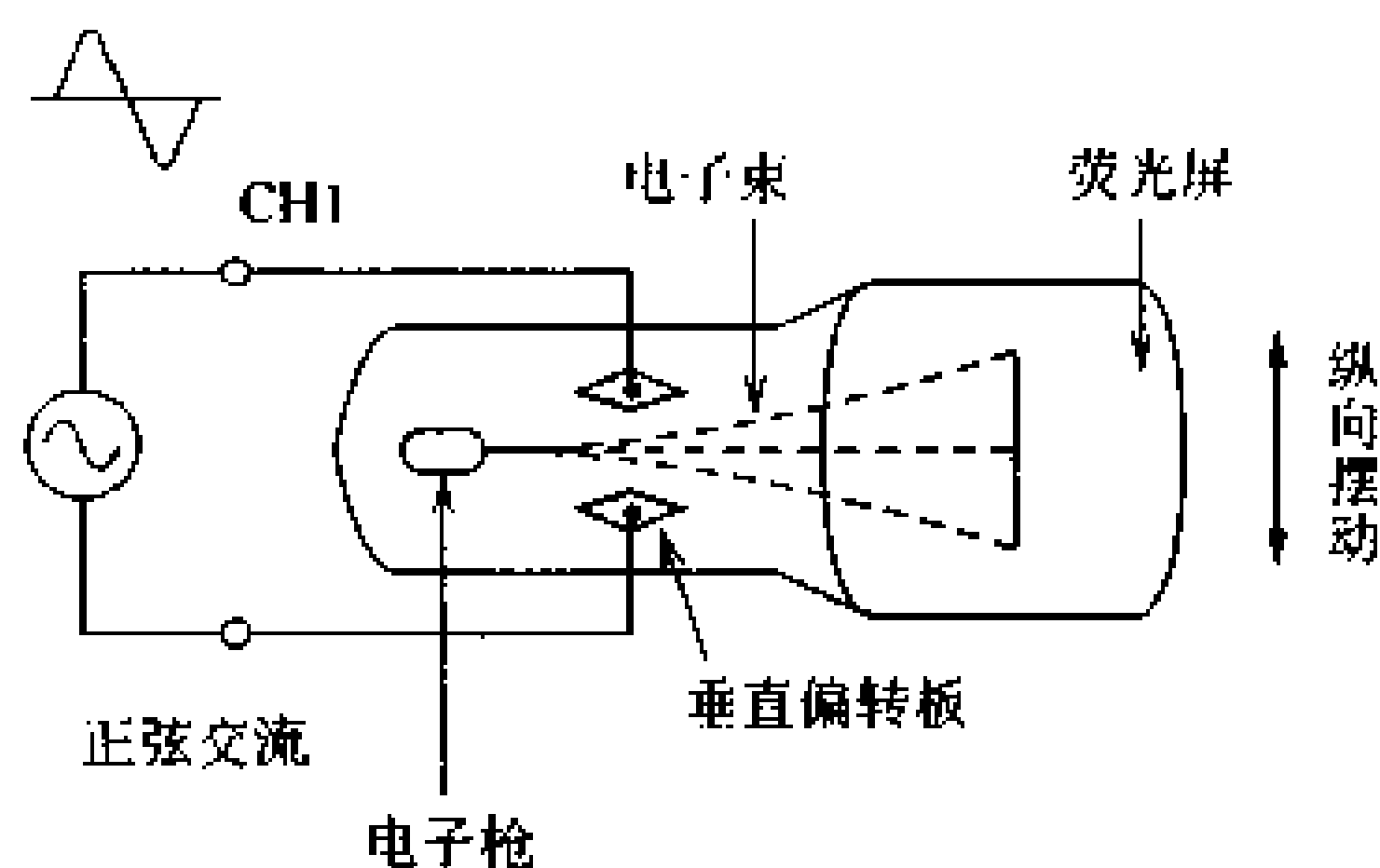


图 5.27 示波器的外观

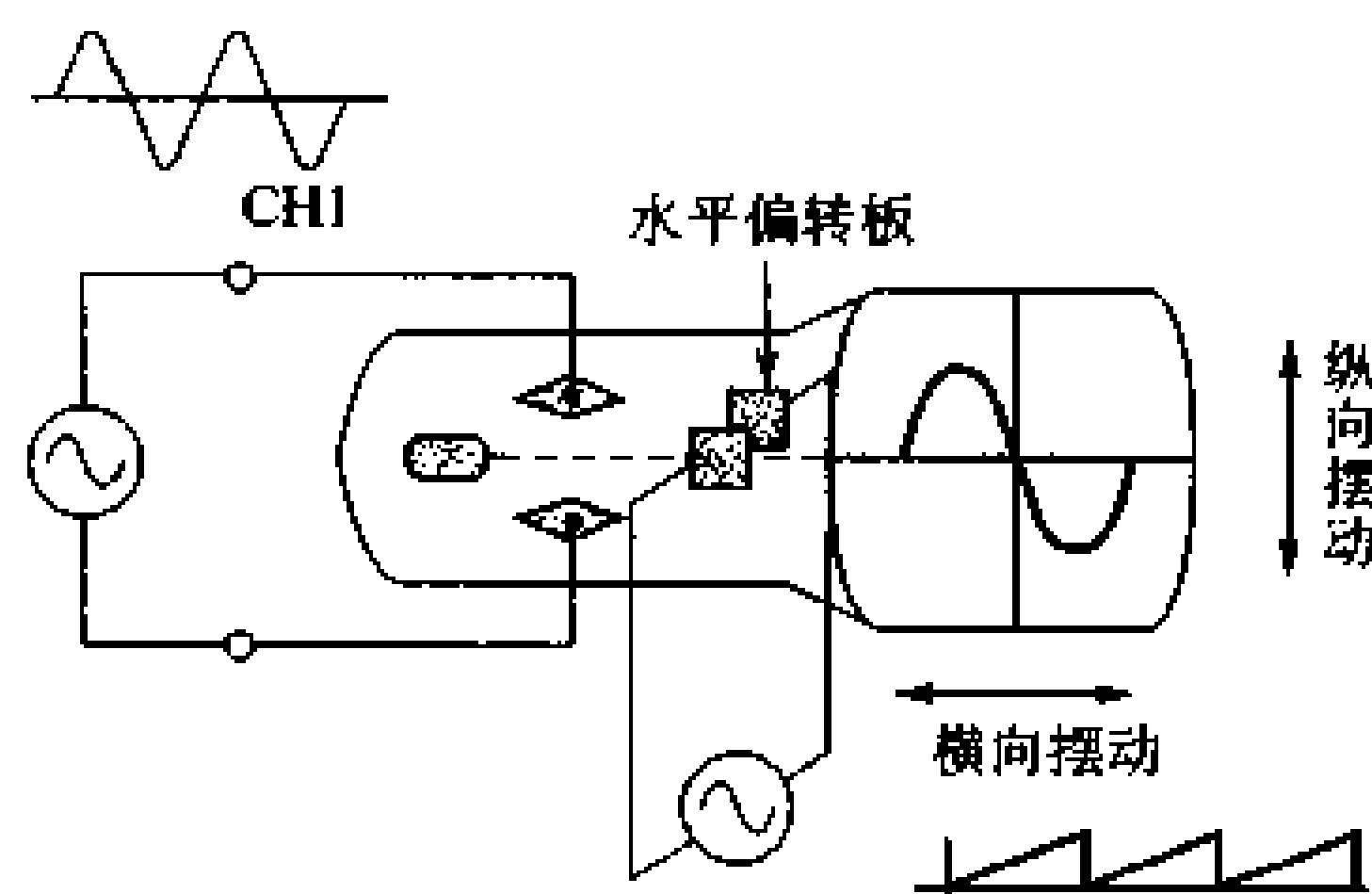
#### ● 数字示波器

图 5.30 为数字示波器的外观,图 5.31 为它的电路构成。其显示器从原来的阴极射线管发展到彩色液晶(TFT),示波器的体积也大大减小了。图 5.27 和图 5.30 都是数字存储式示波器,可

以记忆多个波形。被测信号的 ACM 存储器中每个波形的存储数据为 2k 字(显示 1.5k 字)。



(a) 仅在垂直偏转板上加信号



如在水平偏转板上加上锯齿波(扫描),  
就可看到正弦波

(b) 水平、垂直方向均加上信号时

图 5.28 示波器的结构

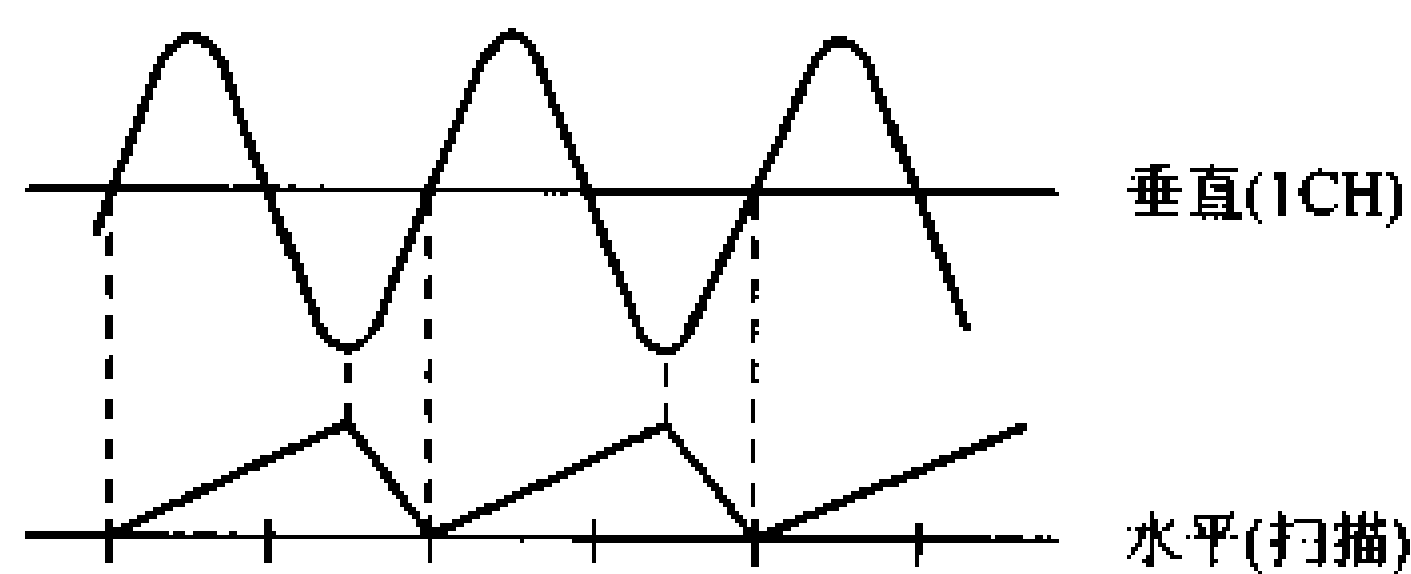


图 5.29 同步状态时的波形

### ● 数字示波器的特点

由于数字示波对输入信号进行了数字处理,所以它既能将数

据解析后以数字形式显示出来,又能通过 GP-IP 或 RS232C 等接口电路将数据送入计算机,对表格和曲线等进行数据处理。



图 5.30 数字存储示波器

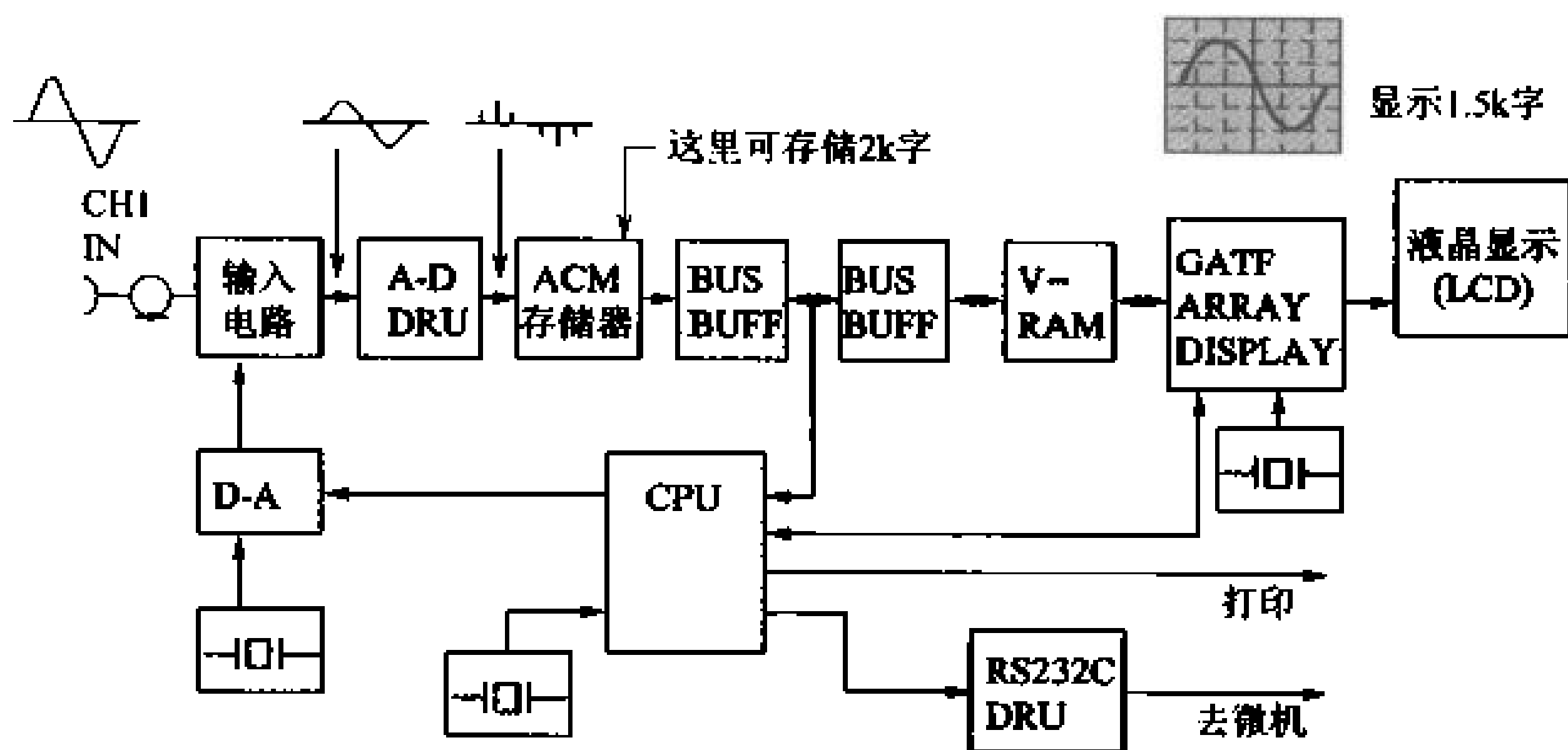


图 5.31 单通道的电路构成

# 10 X-Y 绘图机和 X-Y 记录仪

## □ 要点

X-Y 记录仪是自动地记录函数图形的仪器,当把二个输入电压作为  $x$  和  $y$  时,则变量  $x$  所决定的函数  $y(y=f(x))$  的图形就自动地记录在方格纸上。X-Y 绘图机则是作为通用计算机的终端所出现的设备,它可用于绘制曲线或表格,也可作为计算机 CAD 绘图机。

## □ 解释 ● X-Y 记录仪

图 5.32 为 X-Y 记录仪的外观,图 5.33 为其原理图。如果给记录仪输入二个电压作为  $X$  和  $Y$ ,X-Y 记录仪就能在方格纸上自动记录变量  $x$  所决定的函数  $y(y=f(x))$  的图形。 $X$  轴和  $Y$  轴分别带有各自独立的自动平衡电位差计,其输出信号用于控制伺服电机,使记录笔运动到  $X$  轴和  $Y$  轴的平衡位置,以实现记录。例如记录磁性体的  $B-H$  曲线、电动机激磁电流和速度的特性曲线等。

自动平衡电位  
差计  
伺服电机

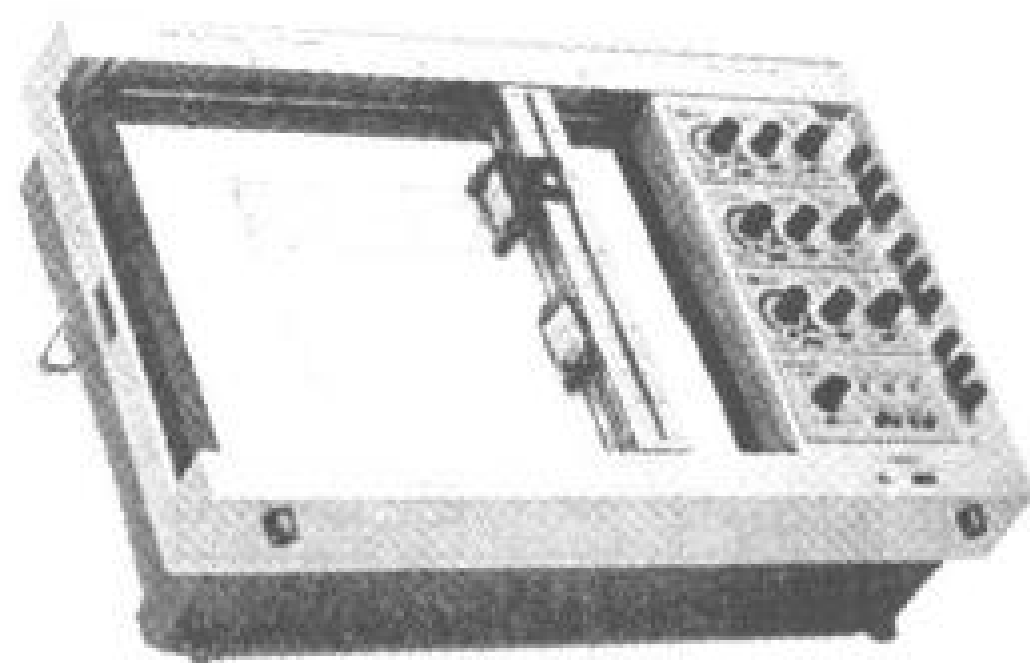


图 5.32 X-Y 记录仪的外观

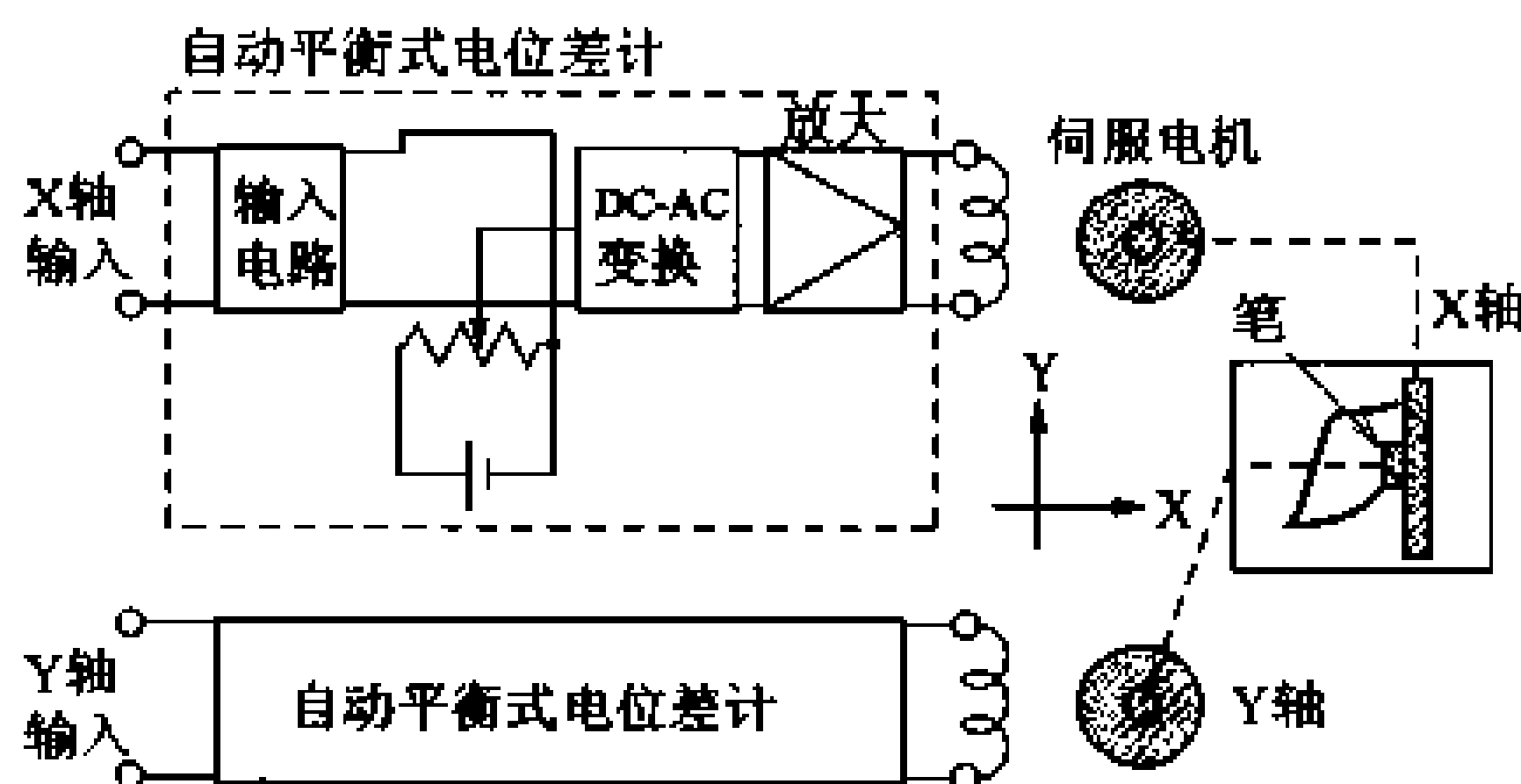


图 5.33 X-Y 记录仪的原理图

静电式绘图机  
 喷墨式绘图机  
 笔式绘图机  
 CAD

## ● X-Y 绘图机

X-Y 绘图机有应用复印机原理的静电式绘图机、采用喷射油墨微粒绘图的喷墨式绘图机以及用笔绘图的笔式绘图机等。计算机 CAD 常用的绘图机多为 A<sub>3</sub> 纸规格的笔式绘图机。这里介绍笔式 X-Y 绘图机。图 5.34 为 X-Y 绘图机的外观图,图 5.35 是它的原理图。随着计算机的普及,绘图机作为 CAD 的绘图设备已迅速得到普及。

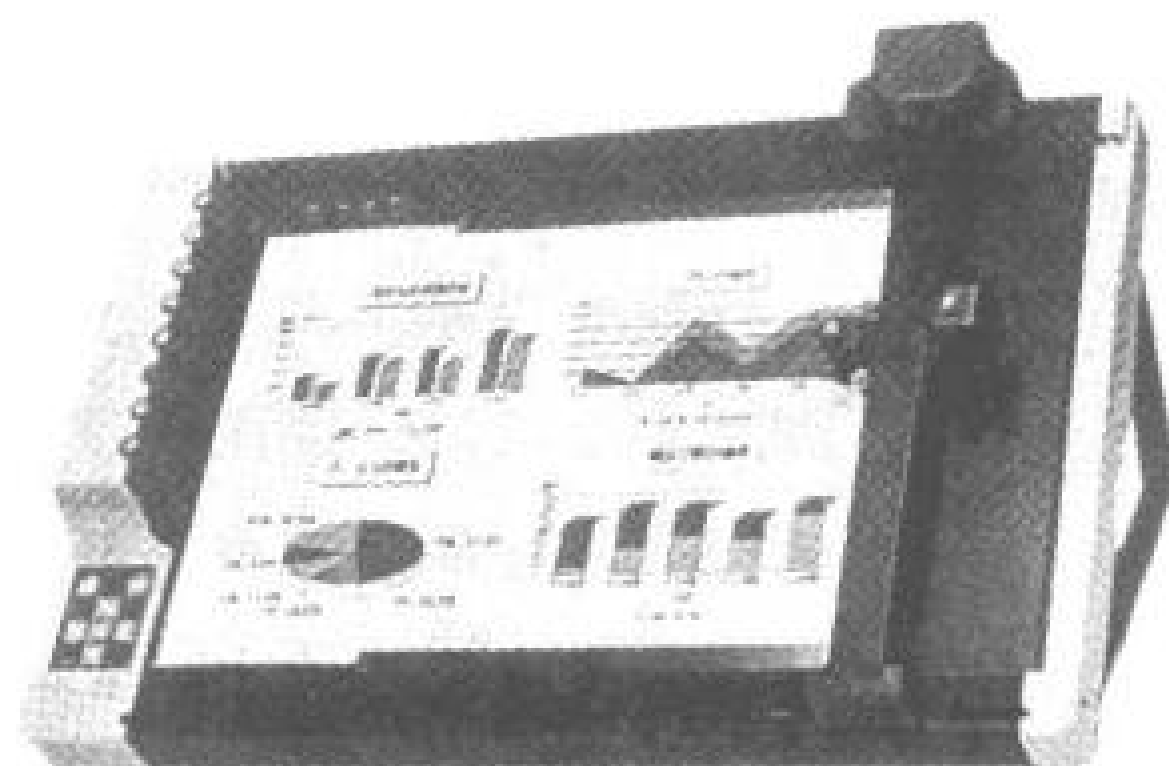


图 5.34 X-Y 绘图机的外观

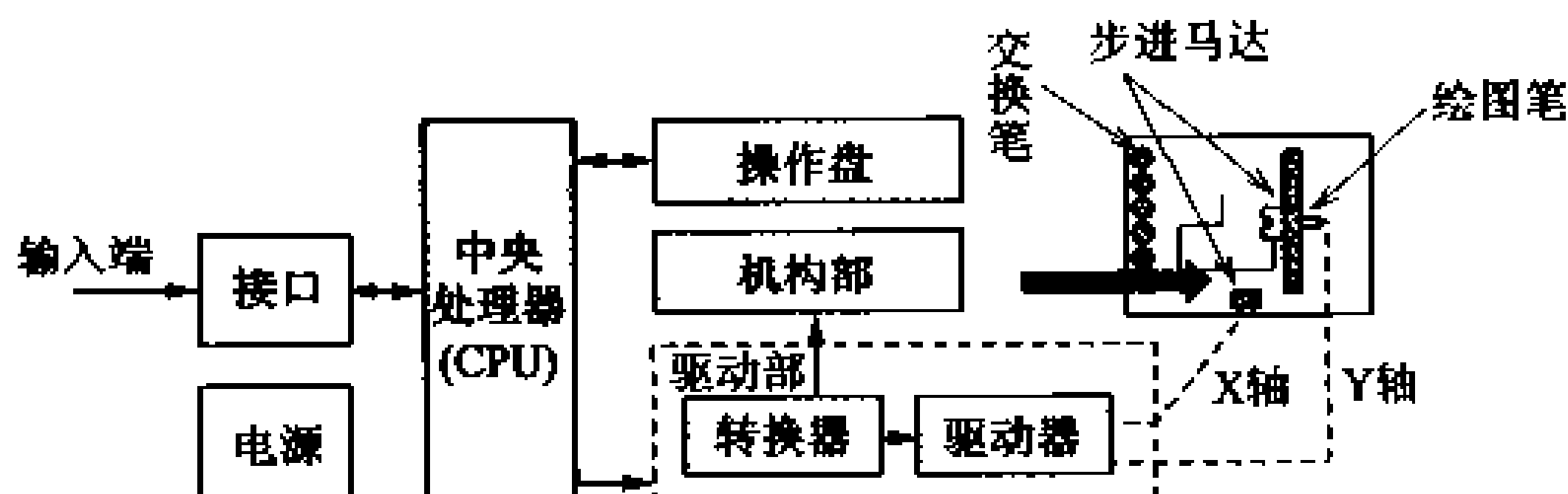


图 5.35 X-Y 绘图机的原理图

X-Y 绘图机由外部联接的接口、控制操作盘、转换器和驱动电路等的控制电路,以及使绘图笔运动的驱动电路所组成。绘图速度一般最高 500mm/s。笔的移动方向如图 5.36 所示,有 8 个方向,利用步进电机 (stepping motor) 使笔移动。步进电机用脉冲信号驱动,1 个脉冲可使笔移动 0.025mm。

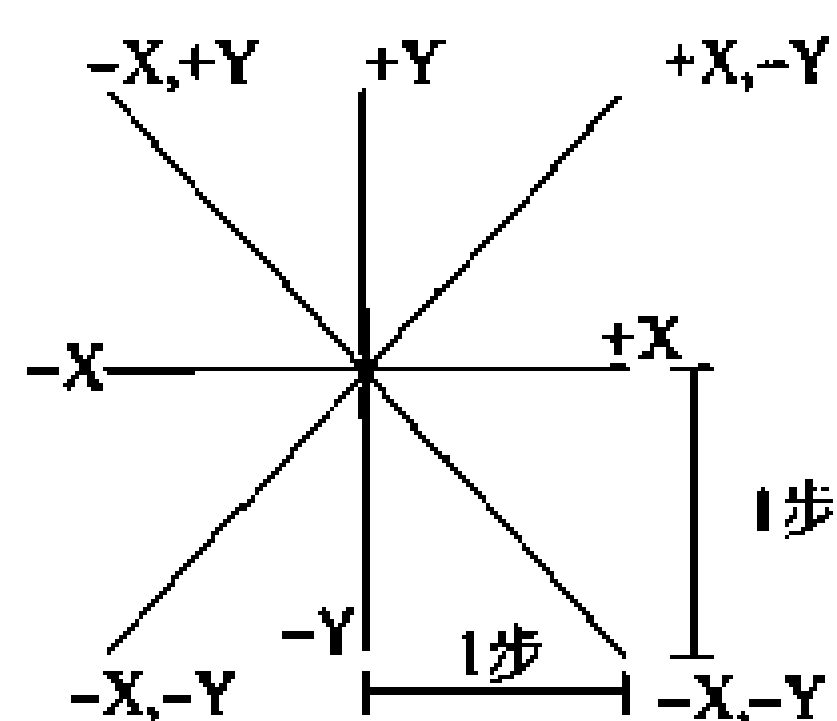


图 5.36 绘图笔的移动方向

步进电机



# 11 各种电桥

## □ 要 点

电阻、线圈的电感、电容器的电容等的测量通常采用电桥。测量电阻时用惠斯登电桥,测量 L、C 时用交流电桥。

## □ 解 释 ● 惠斯登电桥

惠斯登电桥是用于测量  $1\Omega \sim 1M\Omega$  电阻的仪器。图 5.37 是现场常用的便携式电桥的外观图,图 5.38 是电桥的原理图。

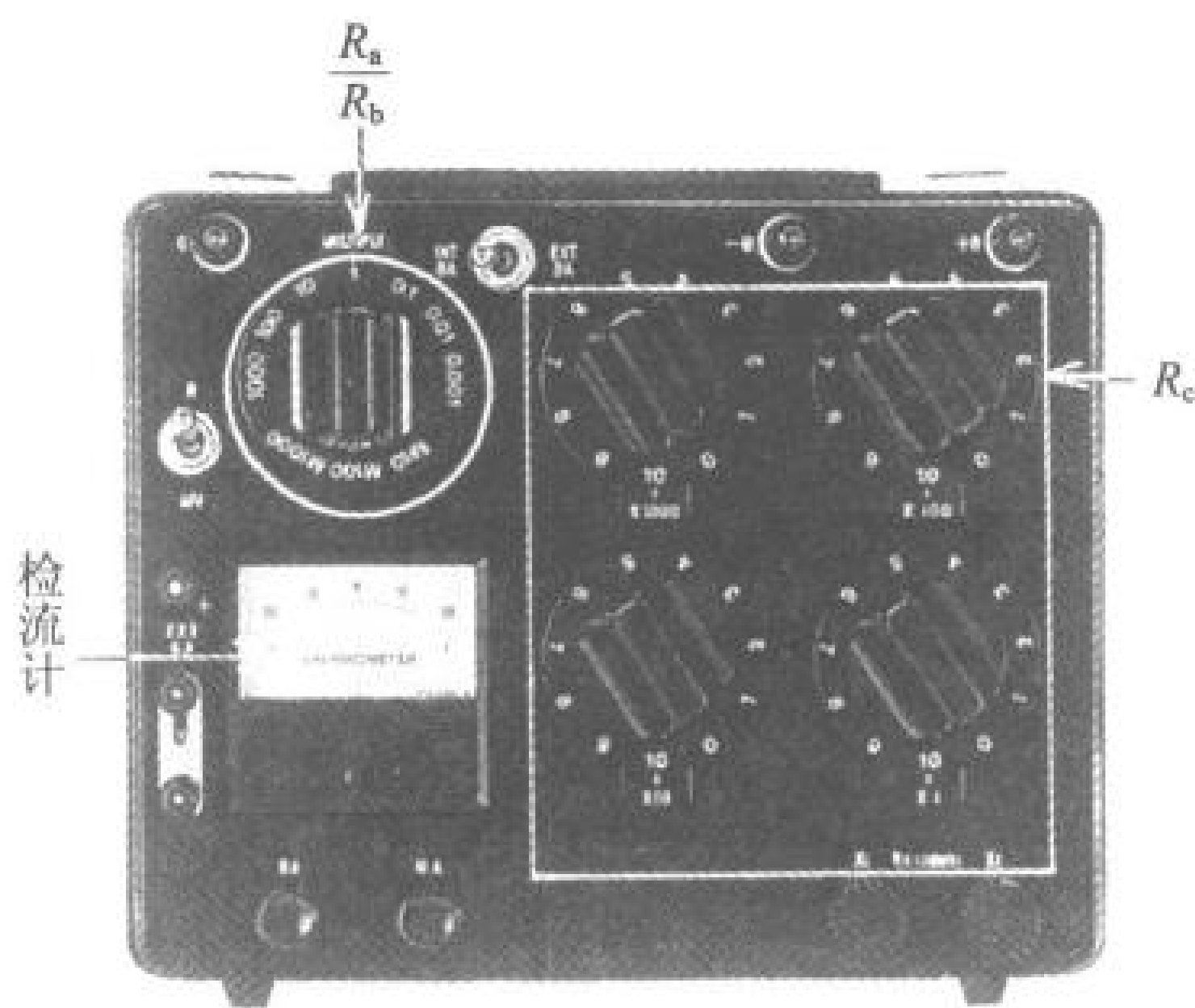


图 5.37 便携式惠斯登电桥的外观

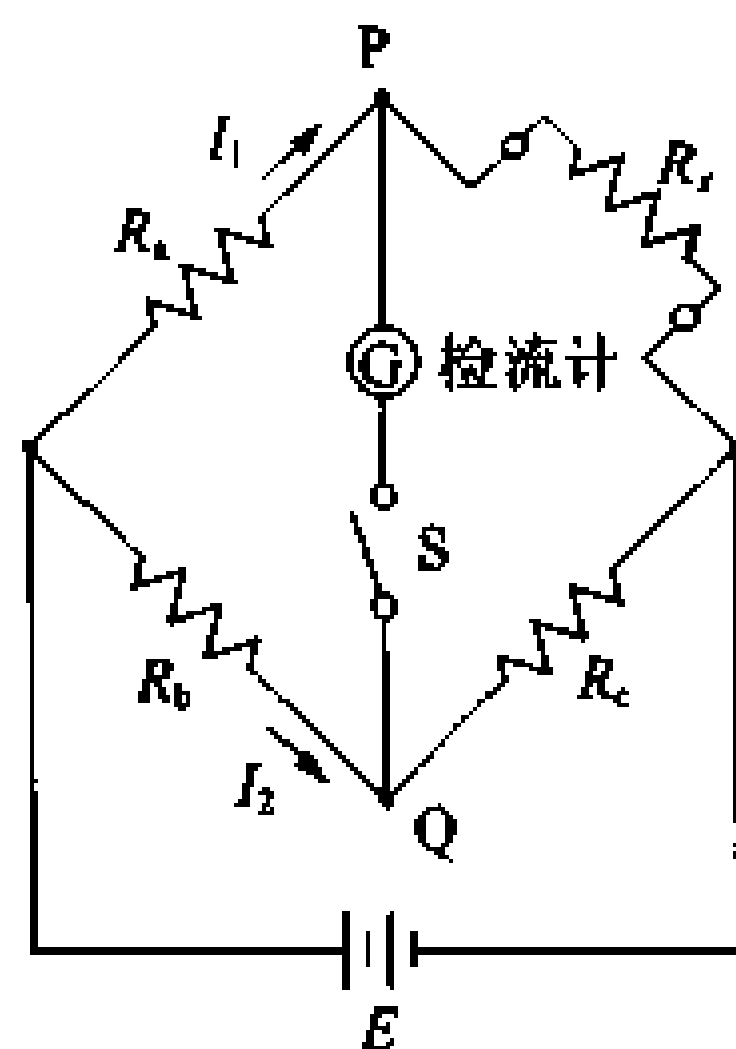


图 5.38 惠斯登电桥

如图 5.38 所示,在电桥的一个臂上接入被测电阻  $R_x$ ,合上开关 S,调节  $R_1, R_2, R_3$  使检流计指示为 0,则 P 点与 Q 点电位相等,于是下式成立:

$$I_1 R_1 = I_2 R_3 \quad (5.3)$$

$$I_1 R_2 = I_2 R_4 \quad (5.4)$$

$$R_x R_2 = R_1 R_3 \quad (5.5)$$

$$\text{所以, } R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 \quad (5.6)$$

这样就可以求出未知电阻  $R_x$ 。

此时的状态称为电桥平衡,

电桥平衡

平衡法(零位法)

这种测量方法称为平衡法(零位法)。使用图 5.37 所示电桥时,可以选择“倍率”旋钮使  $R_s/R_b$  为 0.001,0.01,0.1,10,……等,调节  $R_c$  使电桥平衡,很容易求得  $R_x$ 。如果调节  $R_c$  不能使检流计指“0”时,可用修正法计算求得。

修正法

例如,  $R_c$  为  $278\Omega$  时检流计 G 的值偏左 5 格,  $279\Omega$  时向右偏 3 格,由于总计偏移 8 格,故  $R_x$  为

$$R_x = 278 + 1 \times \frac{5}{8} = 278.63\Omega$$

### ● 交流电桥

图 5.39 为交流电桥的基本电路图。交流电桥常用万用电桥。它是由交流电源、4 个阻抗臂及零点检测器(耳机或示波器)组成。平衡条件和惠斯通电桥相同,测量值可用下面的公式求得

$$Z_x Z_b = Z_s Z_c$$

$$\text{所以, } Z_x = \frac{Z_s}{Z_b} \cdot Z_c \quad (5.7)$$

由该方法可如下测量电容器。电路如图 5.40 所示,从电桥平衡条件可以得到:

$$C_x = C_s \frac{R_b}{R_s} \quad (5.8)$$

$$R_x = \frac{R_s}{R_b} \cdot R_c \quad (5.9)$$

测量电感(线圈)如图 5.41 所示。从电桥平衡条件可以得到

$$L_x = C_s \cdot R_s \cdot R_b \quad (5.10)$$

$$R_x = \frac{R_s}{R_c} \cdot R_b \quad (5.11)$$

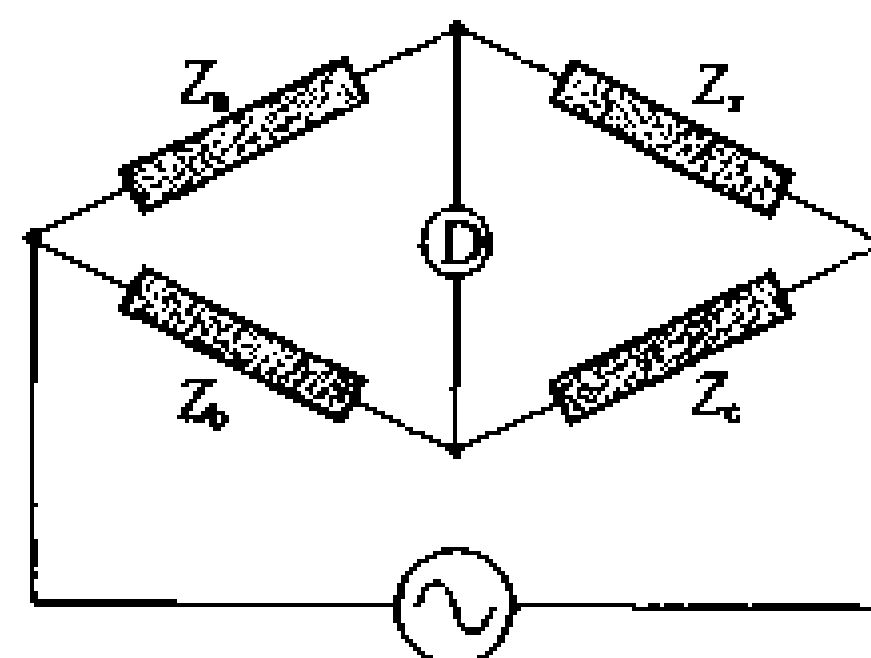


图 5.39 交流电桥

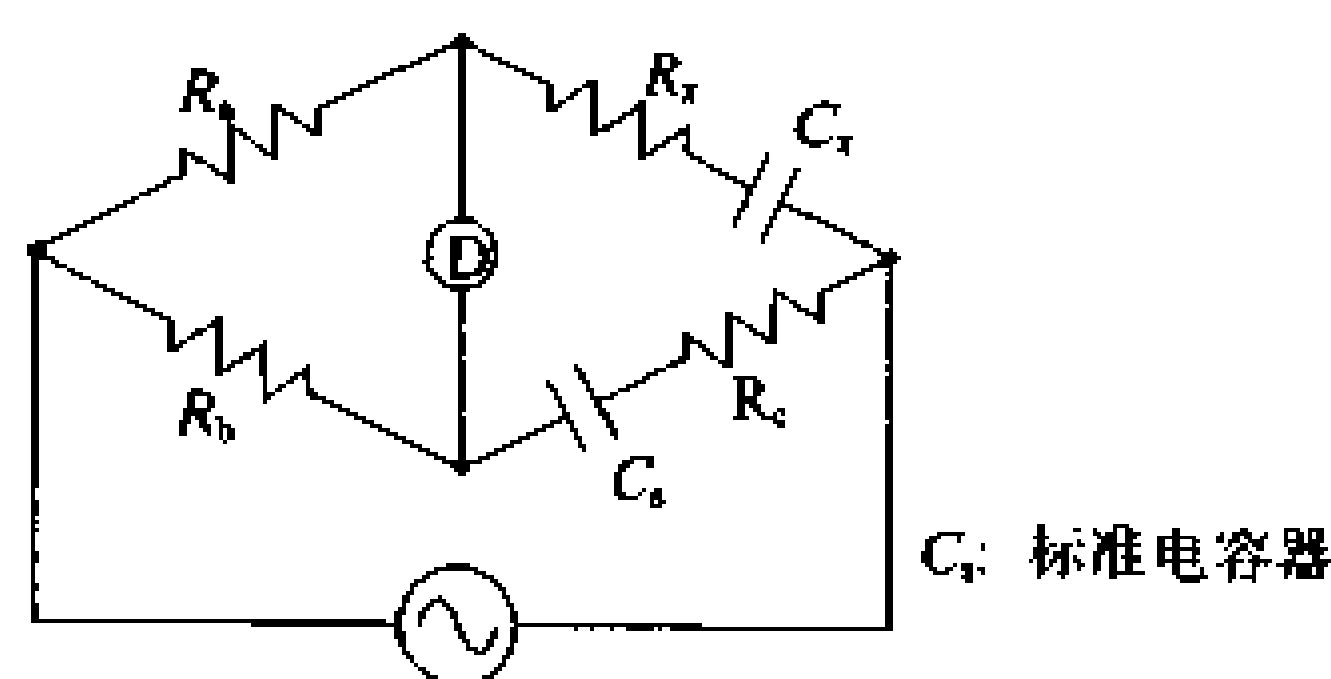


图 5.40 电容的测量

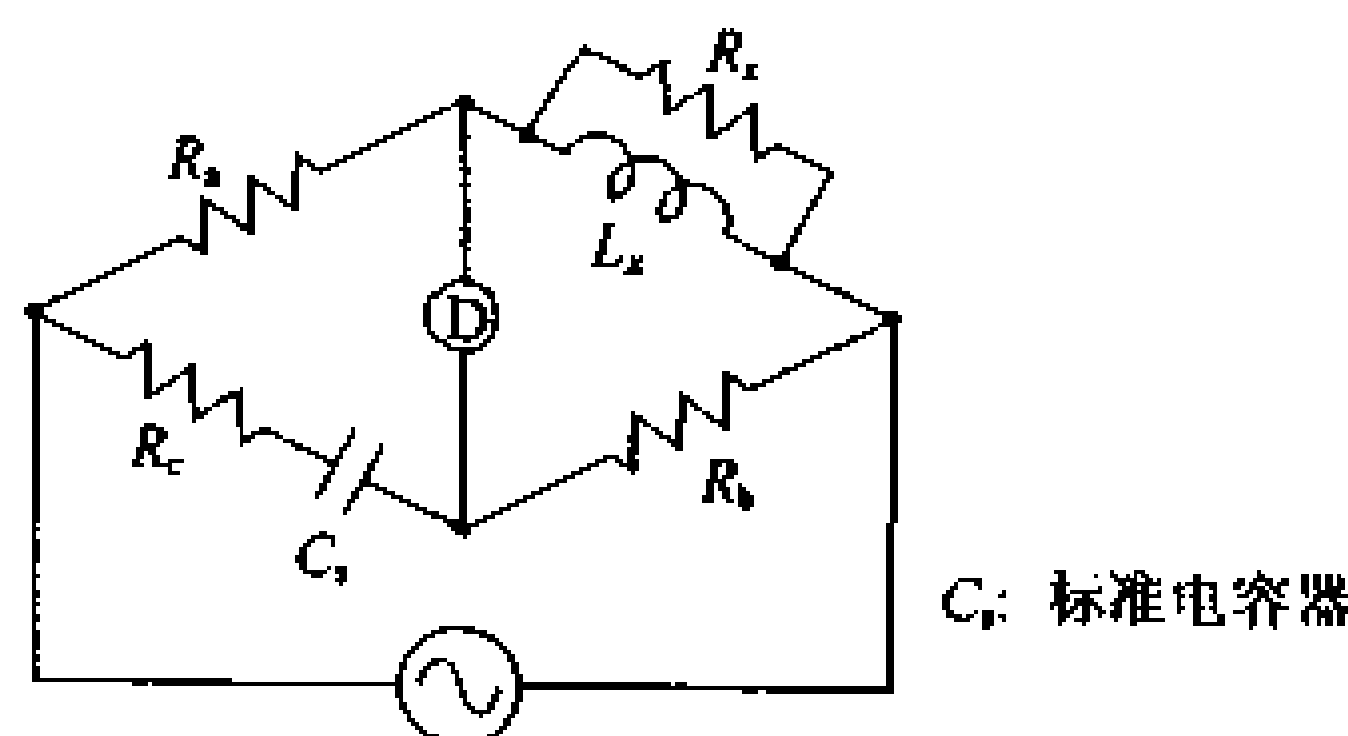


图 5.41 电感的测量

**■ 例 题 求未知电阻**

用图 5.37 和图 5.38 的惠斯登电桥测量电阻时,倍率旋钮的值为 0.1,当  $R_x = 5869\Omega$  时电桥平衡,被测电阻  $R_x$  为多少?

**解说** 从(5.6)式可得到  $R_x = 0.1 \times 5869 = 586.9\Omega$

**答**  $586.9\Omega$

# 12 高频功率的测量

**要 点** 高频(特别是微波段)功率的测量方法有辐射测热功率表法和使用功率传感器的功率表法二种。

**解 释** ● 高频的影响

杂散电容

频率高到微波段时,由于普通导线所具有的电感以及导线与大地之间的电容(杂散电容)等因素,引起了低频情况下不曾想到的现象,产生了电路图中看不到的影响(图 5.42)。

功率的测量也是一样,在低频下可以用电压、阻抗和功率因数来计算功率,但高频下由于看不见的电感和杂散电容的影响,阻抗大小无法确定。因而,出现了将高频能量转换成热能进行测量的方法。

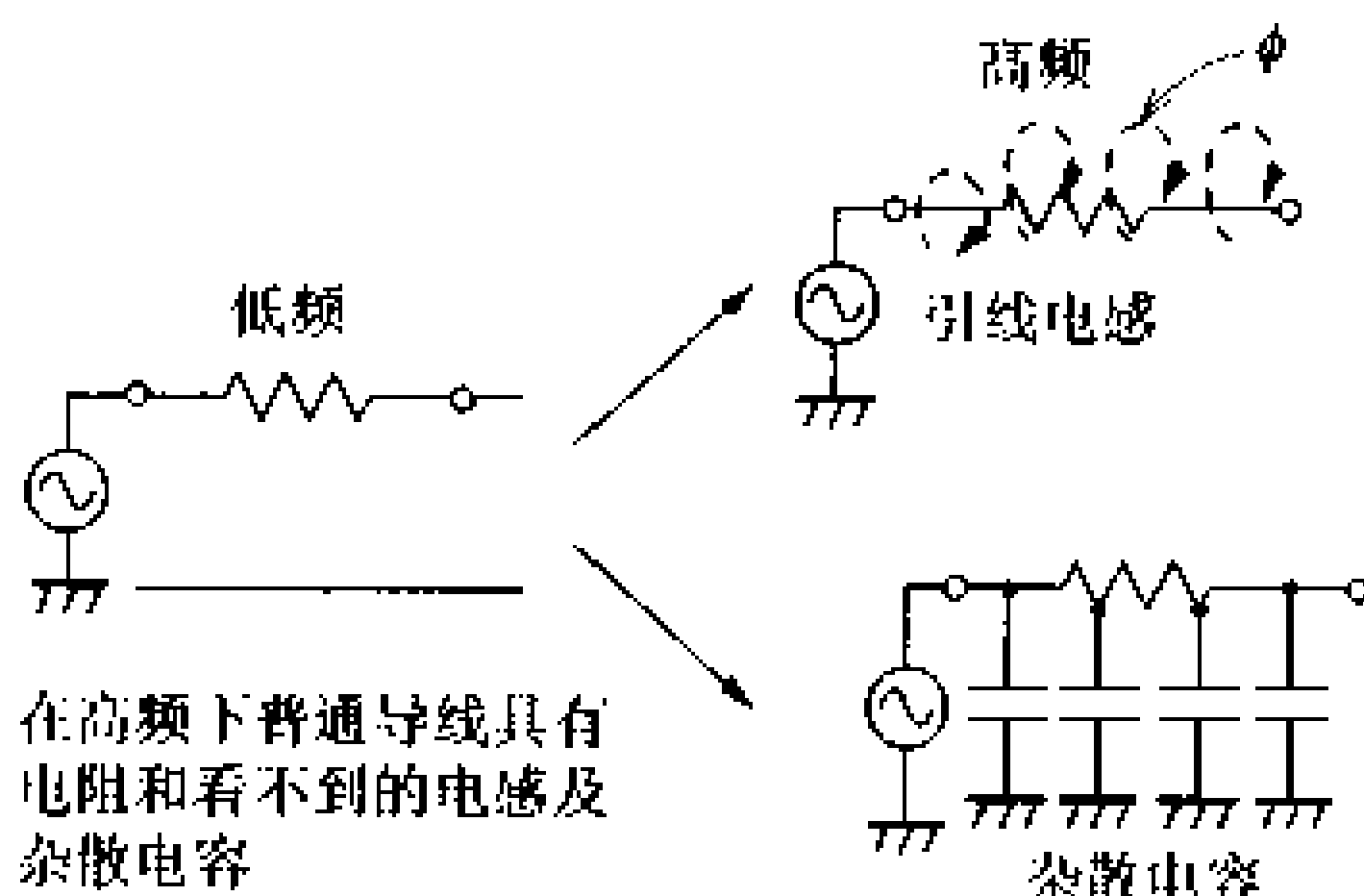


图 5.42 高频的影响

## ● 辐射测热功率表

辐射测热

辐射测热元件是当它吸收了高频电能后温度上升,其电阻值就发生变化的元件。常用的有热敏电阻和热线检测器。

图 5.43 所示的电桥能测量高频功率。设  $R_1 = R_2$ , 则  $R_3$  与辐射测热元件的电阻相等时,电桥达到平衡。此时由于  $I_1 = I_2$ , 即为电流表示值的一半。所以,首先给电桥加直流电压,调节  $R_v$  使电桥平衡,设此时的电流为  $I_0$ , 则辐射测热元件消耗的功率即为  $(I_0/2)^2 R_H$ 。然后使被测高频电流流过辐射测热元件,用同样的方法使电桥平衡。设此时电流为  $I_b$ , 则辐射测热元件消耗的功率即为  $(I_b/2)^2 R_H$ 。它与直流时消耗的功率之差即为高频功率。高频

功率  $P[W]$  可用下式求得：

$$P = \frac{R_0}{4} \times (I_s^2 - I_b^2) \quad (5.12)$$

\*  $R_0 = R_s$  (译注)

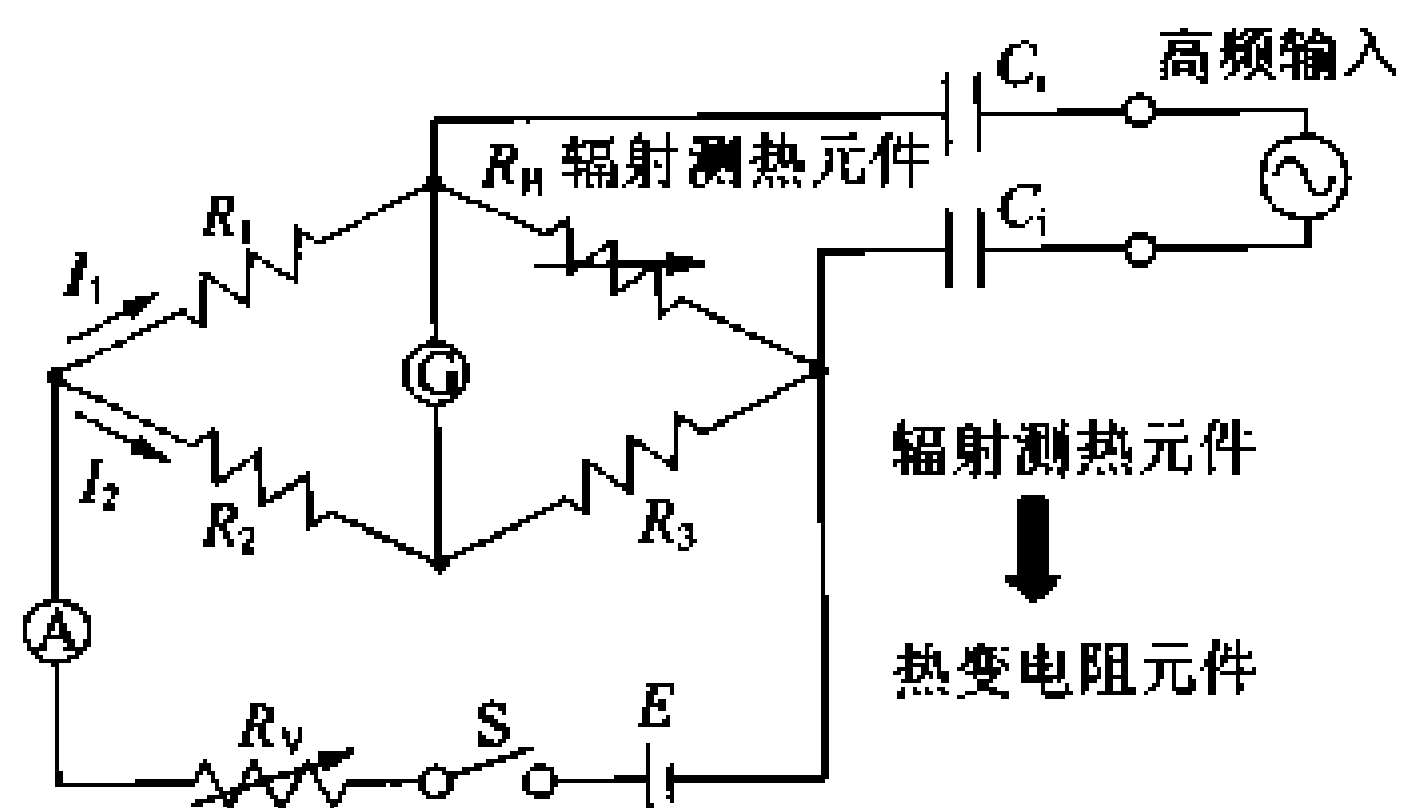


图 5.43 辐射测热法测量功率

### ● 使用功率传感器的高频功率表

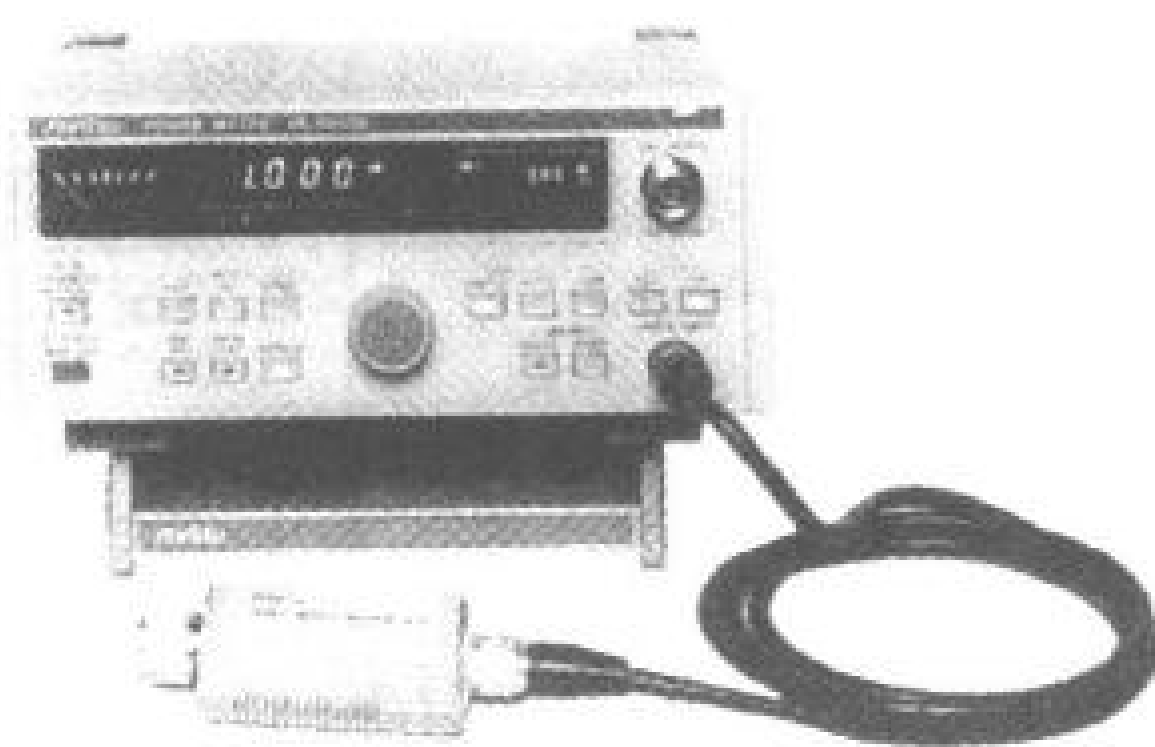


图 5.44 功率表与功率传感器

图 5.44 为使用功率传感器的功率表的外观图，图 5.45 为它的电路构成。

辐射测热法是利用吸收高频电能使温度升高，从而使电阻值发生变化来测量功率的。与之

#### 功率传感器

相应，功率传感器则是让电阻吸收高频电能而用热电偶检测其温度的上升。这种热电偶采用无定形半导体薄膜。这种功率表可说是一种热电转换式功率表。

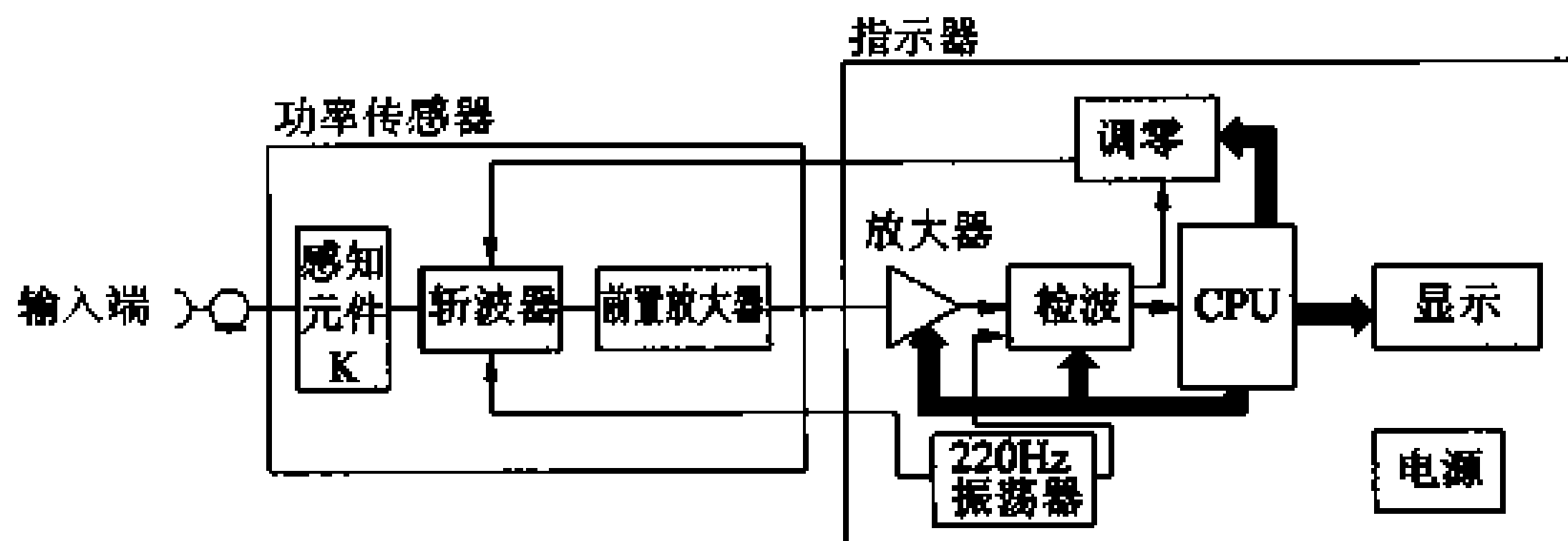


图 5.45 功率表的电路构成

# 13 电场强度的测量

**要 点** 电场强度是表示接收地点电波强弱的参数。在微波波段常用功率密度表示。本章以电平表为例说明电场强度的测量。

**解 释** ● 电场强度

电场强度是表示接收地点电波强弱的参数，单位为 $[\mu\text{V}/\text{m}]$ ，它表示每米直线导体上产生的感应电动势。通常取  $1\mu\text{V}/\text{m} \approx 0\text{dB}\mu$ 。电场强度可以采用在待测地点放一个已知有效长度的天线，并用专用的测量接收机来测量天线上所产生的感应电压来求得。

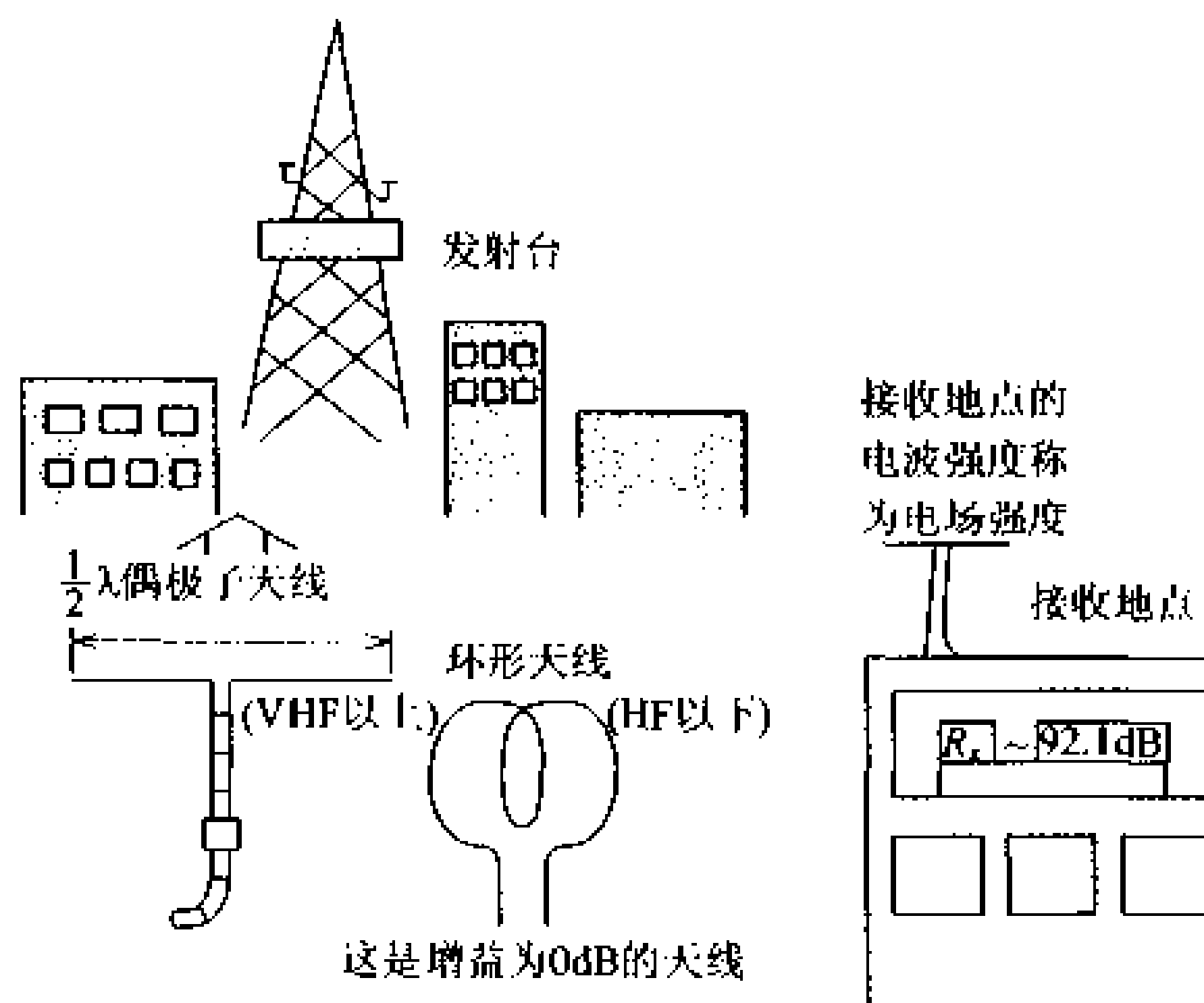


图 5.46 电场强度与测量用的天线

## ● 电平表

电场强度测量仪  
电视天线  
共用电视系统  
信号电平表

电场强度测量仪器有多种，这里来看一看常用于调整电视天线和共用电视系统的信号电平表。图 5.47 是信号电平表的外观，它是由电信号接收机和电子电压表组合成的仪器。

由于该仪器中对信号进行了 A-D 转换和数字处理，并采用了频率合成器，所以频率设定准确，接收范围宽。另外，这种电平表具有显示频谱的功能。表 5.7 为产品性能指标概要。

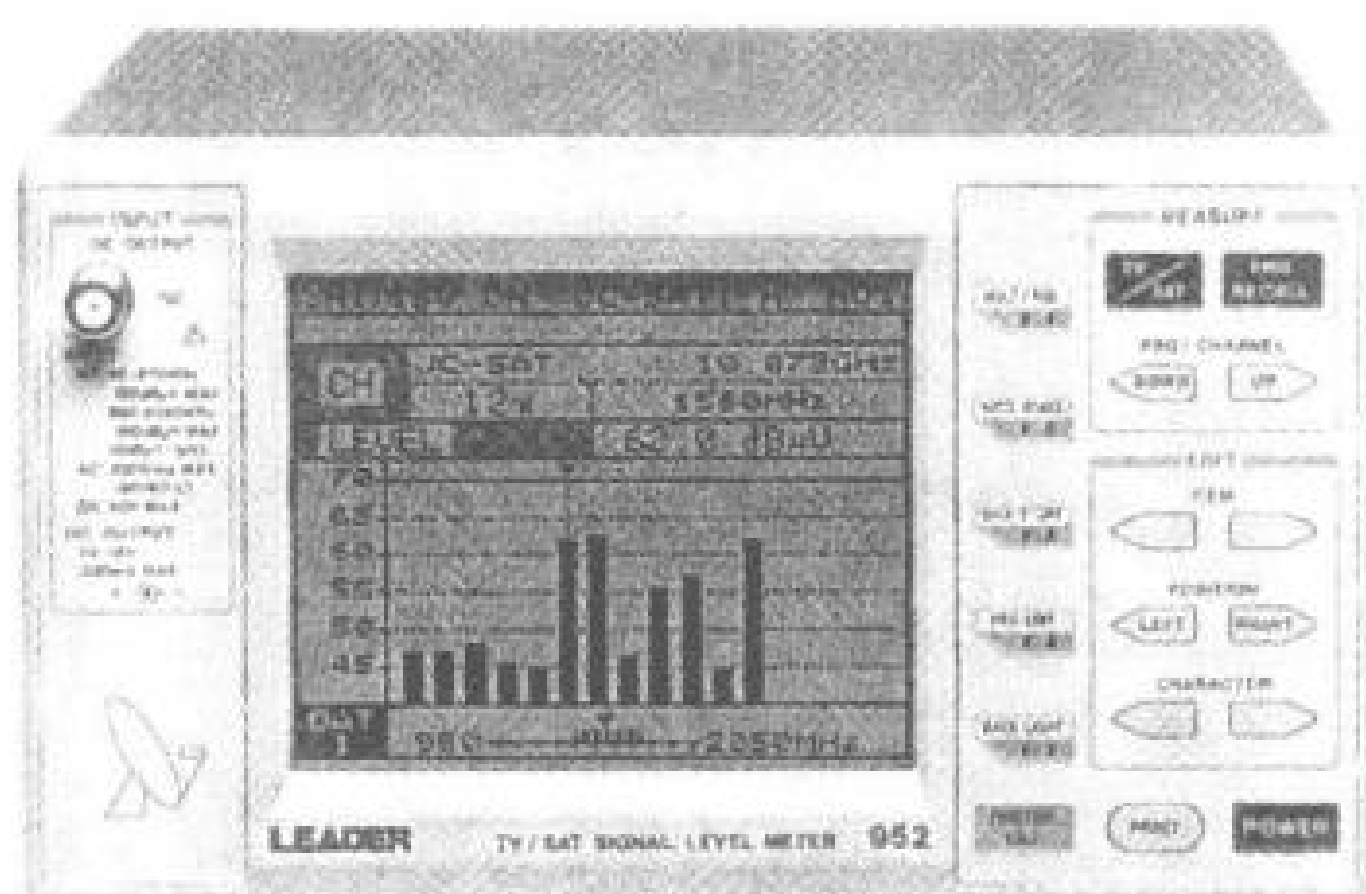


图 5.47 电场强度测量仪的外观

表 5.7 电场强度计性能指标概要

项 目	范 围
接收频率	VHF/UHF/CATV: 46MHz~870MHz 卫星: 950MHz~2050MHz
设定频率	VHF/UHF/CATV: 50kHz 间距 卫星: 1MHz 间距
设定频道	日本, 日本有线电视, 美国等
电平测量范围	VHF/UHF/CATV: 20dB $\mu$ V~120dB $\mu$ V (1 $\mu$ V=0dB $\mu$ V, 75 $\Omega$ 终端值显示) -40dBmV~60dBmV (1mV=0dBmV, 75 $\Omega$ 终端值显示) 卫星: 45dB $\mu$ V~100dB $\mu$ V (1 $\mu$ V=0dB $\mu$ V, 75 $\Omega$ 终端值显示)
分辨率	0.1dB
精度	$\pm 3$ dB

### ● 电场强度的测量

用电平表测量电场强度时, 首先按图 5.48 进行联接, 并设定测量频率和频道。所使用的天线增益应是已知的, 或者选用增益为 0dB/m 的 1/2 波长偶极子天线。电场强度  $G_o$  [dB/m] 可以从实测的测量电平  $G_r$  [dB/m] 利用下式求得:

$$G_o = G_r - G_H - G_A \quad (5.13)$$

式中  $G_r$  ——测得的电平 [dB/m];

$G_H$  ——无线的有效高度 [dB/m];

$G_A$  ——天线增益 [dB/m]。

信号波长  $\lambda$  是天线尺寸的基准, 所以要预先求出, 其计算公式为

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{f} = \frac{300}{f[\text{MHz}]} \tag{5.14}$$

对于  $\lambda/2$  偶极子天线,要把天线的有效高度  $G_H$  换算为分贝表示时,可用下式求:

$$G_H = 20 \lg \frac{\lambda}{\pi} \tag{5.15}$$

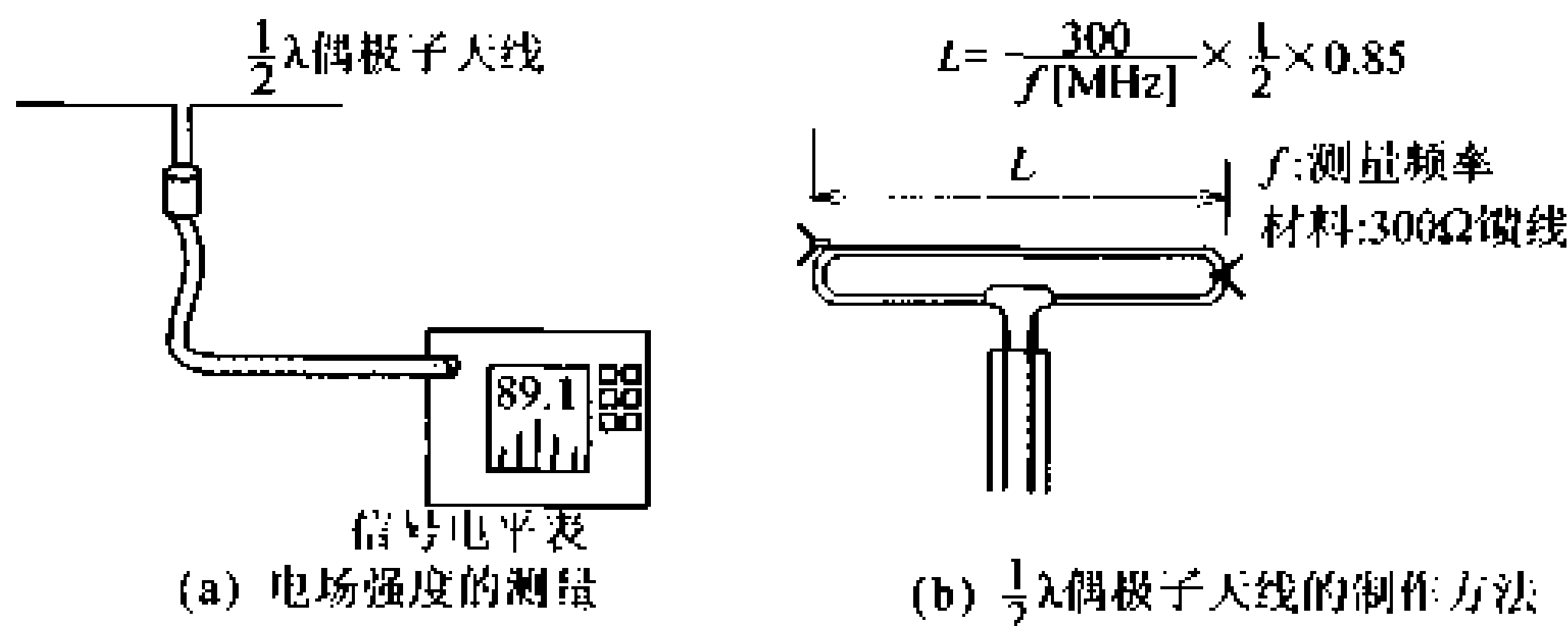


图 5.48 电场强度的测量及  $\lambda/2$  偶极子天线

## 相关知识 ● 测量设备与计算机

图 5.47 所示的电场强度测量仪不仅可以测量电场强度,同时还具备许多别的功能。例如频谱分析仪的功能和数字显示功能。另外,还可装上 GP-IB 或 RS232C 等接口与外部进行数据交换。由于测量仪上带有单板机,所以它不但能与计算机联接进行自动测量,并且能同时测量若干个不同的参数。

## 例 题 求电场强度

图 5.48 中,1 频道(91.25MHz)的测量频率为 89.7dB $\mu$ V。求用  $\lambda/2$  偶极子天线测量时的电场强度为多少?

**思路** 根据(5.14)式求波长,然后将天线的有效高度换算成用分贝表示,就可以求得电场强度。

**解说**  $\lambda = \frac{300}{89.7} \approx 3.29\text{m}, G_H = 20 \lg \frac{3.29}{\pi} \approx 0.396$

由于  $\lambda/2$  天线的增益为 0dB/m,故电场强度为

$$G_o = G_r - G_H - G_A = 89.7 - 0.396 - 0 \approx 89.3$$

**答** 电场强度为 89.3dB/m



# 14 噪 声

□ 要 点

噪声(杂音)是指所需信号之外的一切无用信号。在放大电路和通信线路中,由于各种原因使输入信号产生幅度失真和相位失真,这些失真将作为噪声与信号一起输出。因而会造成不能正确测量或工作失常。

□ 解 释

● 噪声的种类及产生原因

辐射噪声  
传导噪声

噪声(杂音)可分为对外产生干扰和受外部干扰两种。其传播路径均是二个,即经空间(设备和输入输出电缆)传播的辐射噪声和经电源电缆传播的传导噪声(图 5.49)。

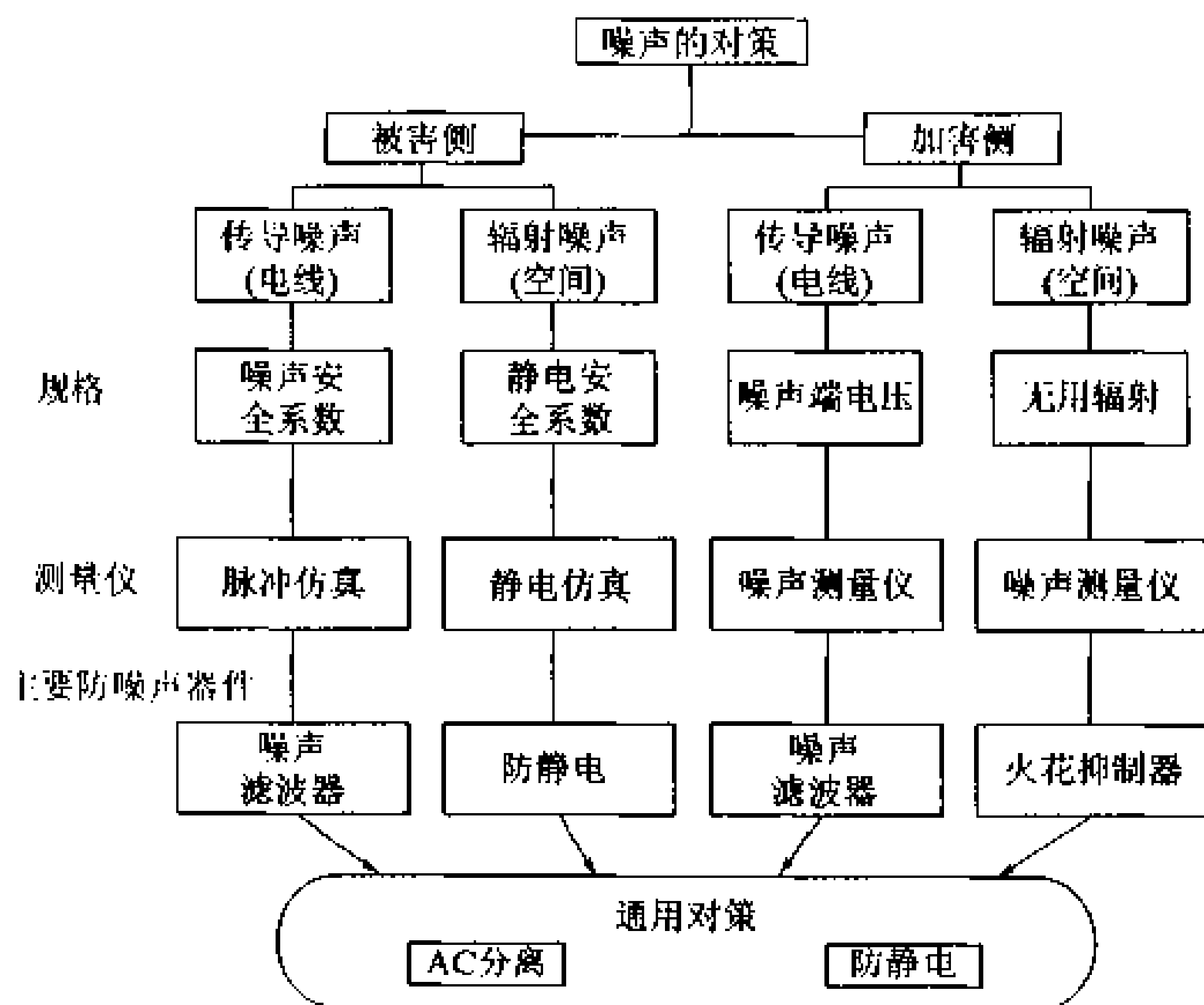


图 5.49 噪声的对策

噪声到处都可产生。汽车驶过时,收音机里会听到火花塞放电脉冲干扰造成的“沙沙”声,离计算机太近的电视机屏上会出现干扰条纹。交流电源是通过输电线送给用户的,其间经过许多噪声源,混进噪声的可能性很大。

信号电压  $S$   
噪声电压  $N$   
分贝[dB]

### ● 信噪比的测量

信噪( $S/N$ )比是信号电压  $S$ (signal)与噪声电压  $N$ (noise)之比,其单位用分贝[dB]表示。图 5.50 举例示出音频放大器  $SN$  比的测量方法。

### ● 测量方法

① 将开关  $A$  扳到  $S$ ,来自振荡器的额定电压加到放大器的输入端,调节放大器的音量旋钮使输出到达额定值。此时电子电压表的读数为  $S$ [dB]。

② 将开关  $A$  扳到  $N$ ,保持放大器的音量旋钮不动,读取电子电压表的读数。这时电子电压表的读数为  $N$ [dB]。于是, $SN$  比可用下式求得

$$SN = S - N \quad (5.16)$$

音频放大器信噪比一般为  $60\text{dB} \sim 100\text{dB}$ 。

噪声指数  $NF$

信号通过接收机等设备的电路后, $SN$  比会有所下降。信噪比下降的多少称为噪声指数  $NF$ (noise figure),常用于表示接收机等设备的  $SN$  比的恶化程度。设接收机输入端的  $SN$  比为  $SN_i$ [dB],输出端的  $SN$  比为  $SN_o$ [dB],则噪声指数  $SF$ [dB]可用下式求得:

$$NF = SN_i - SN_o \quad (5.17)$$

接收机的  $NF$  一般约为  $10\text{dB}$ 。

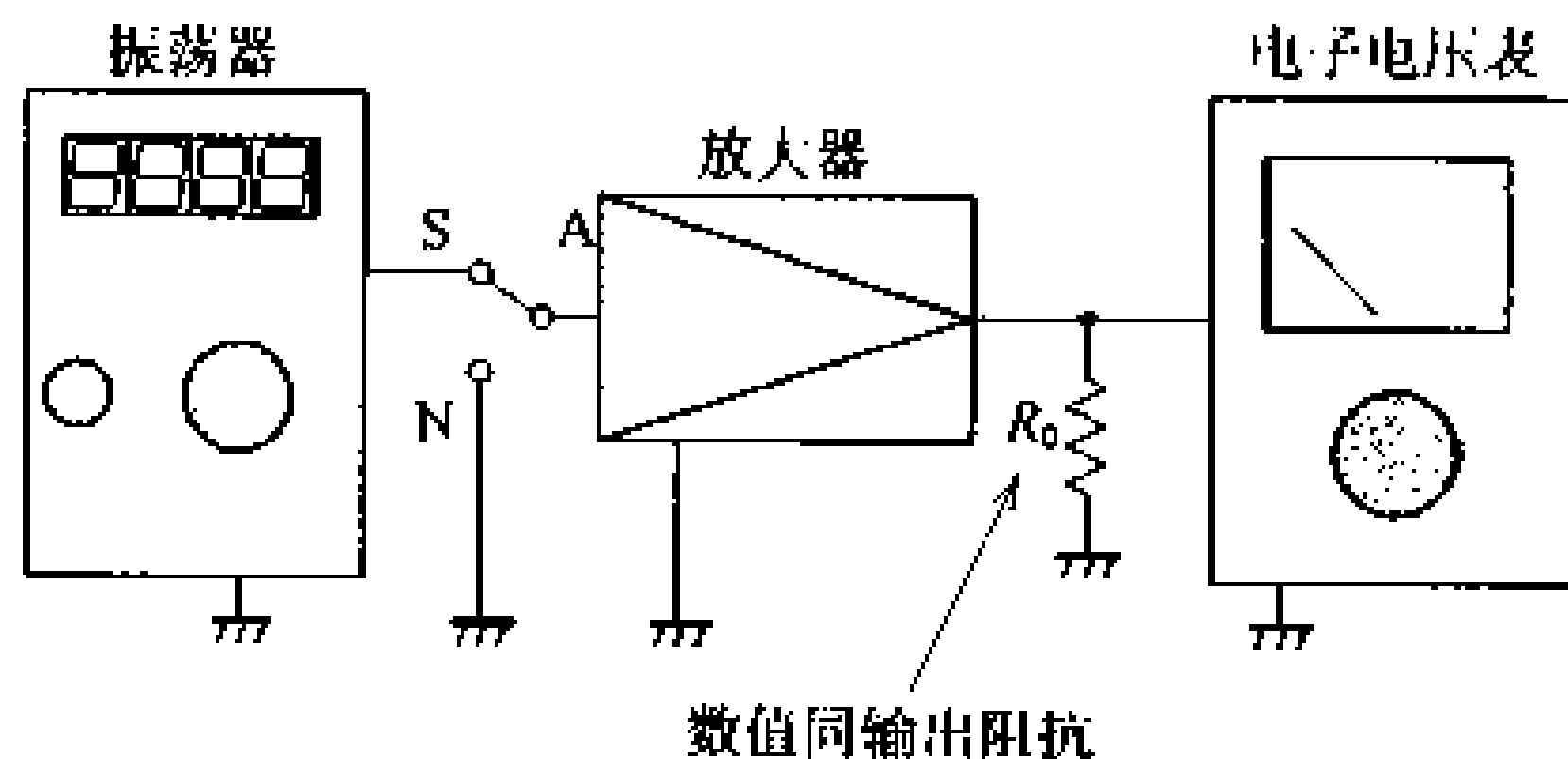


图 5.50  $SN$  比的测量电路

## ■ 应用基础 ■ 如何防止噪声

为了避免噪声的影响,电子线路的设计和测量中必须遵循如下的基本原则(图 5.51)。

### □ 信号线与电源线分开

交流电源带有很多噪声,不能将交流电源的引线与其它信号线轧在一起。

## ② 正确接地,防止静电干扰

集成块的 NC 端应接地,各个测量仪器的接地端应联接在一起。联线要尽量短。

## ③ 一点接地与屏蔽

在一个机箱中有数字电路、模拟电路、电源电路混合安装时,要将每块线路板分开布线,最后统一接地。这种方法称为一点接地法,对防止噪声是十分有效的。

此外,对于高输入阻抗或小信号放大等电路,最好根据需要采取屏蔽措施。

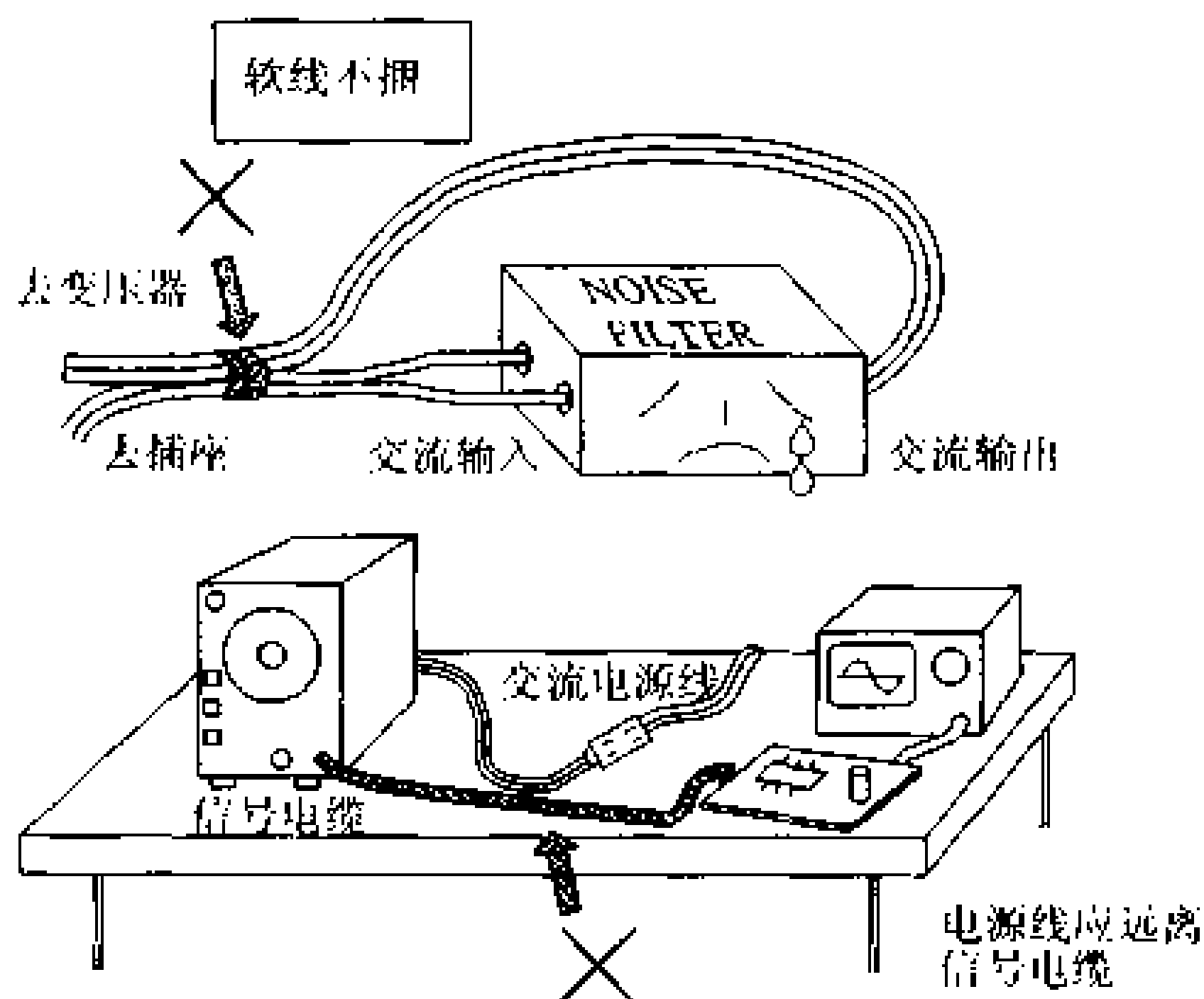


图 5.51 信号线与电源线分开防止噪声

# 15 传感器与生物体的检测

**要 点** 传感器是将各种信息变为电信号的元件。本节将介绍传感器的种类和使用方法。

**解 释** **● 传感器的种类和使用方法**  
传感器(sensor)是将温度、光等非电量转换成电学量的元件(图 5.52)。传感器可起到人的五官(眼、耳、鼻、舌、皮肤)那样的作用,但它不能像皮肤那样同时感知压力、温度等多种信息,只能把各个单一信息的传感器汇集起来。传感器只是机器的感觉器官,它必须和电压表或示波器等测量仪器结合才能完成对某个物理量的测量。表 5.8 列出传感器的主要种类和检测对象。

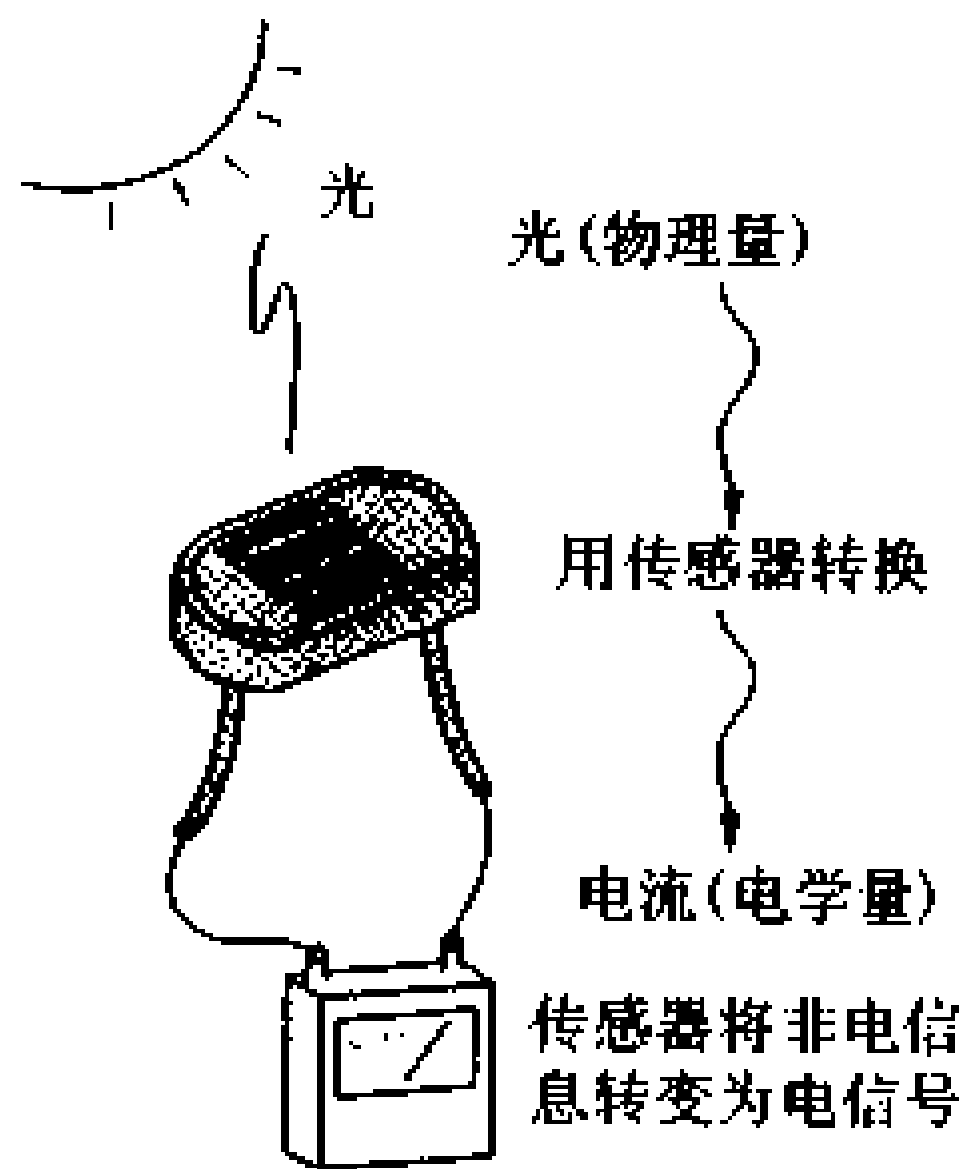


图 5.52 传感器是信息转换元件

表 5.8 传感器的种类及检测对象

项目	传感器种类	代表性元件	主要检测对象
温度	热敏电阻	热敏电阻	温度
光、射线	可见光传感器 红外传感器	CCD、CdS 光二极管	亮度、光强度 生物体,条型码
化学		n 型氧化物半导体	液化气,煤气、天然气

## □ 相关知识 ● 利用热电型红外传感器检测生物体

### 热电型红外传感器

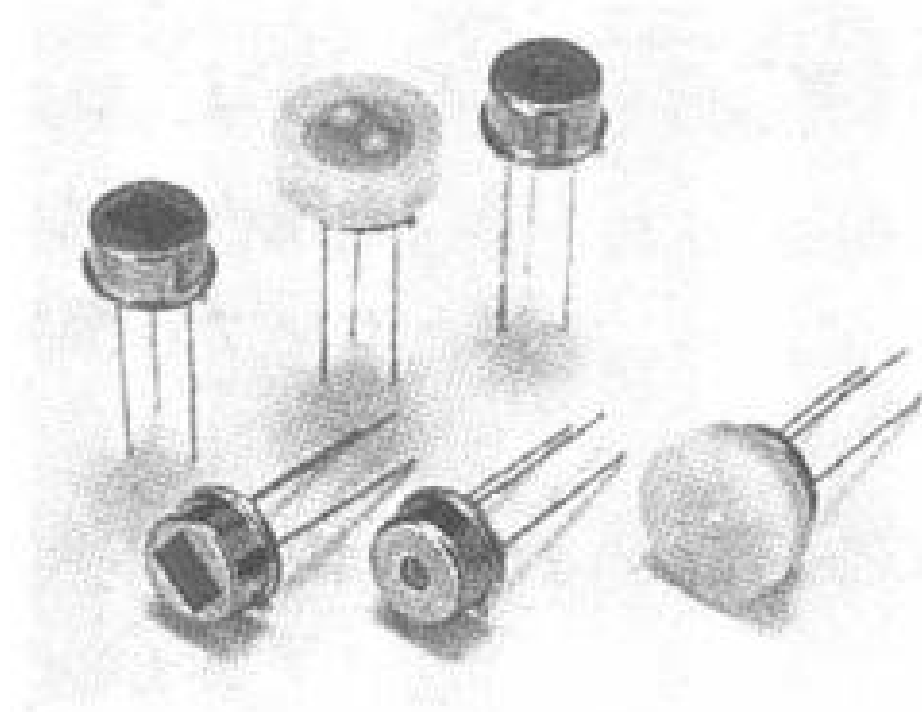


图 5.53 红外传感器的外观

热电型红外传感器及应用实例示于图 5.53 和图 5.54。当动物或人等生物体在热电型红外传感器的视野内移动时, 红外线能量的分布就会发生变化, 这种变化能被红外传感器检测到。由于检测到的信号太小, 所以

需经运算放大器加以放大, 再用脉冲触发比较器转换为脉冲信号, 由定时电路形成 LED 和继电器电路的输出。

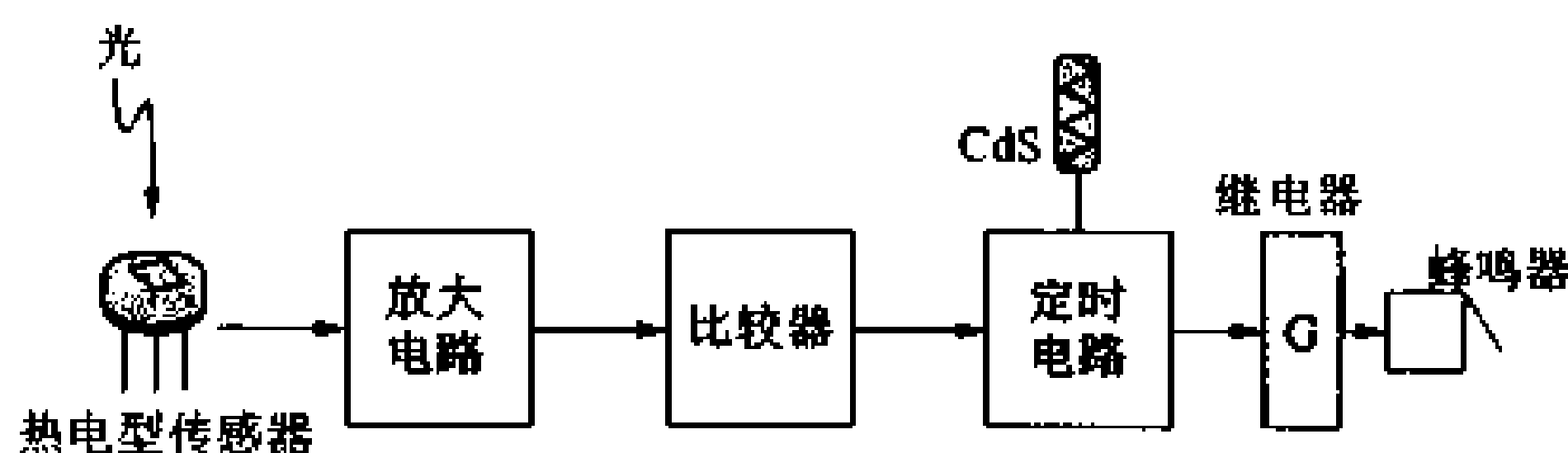


图 5.54 由热电型红外传感器构成的报警器

## ● 利用红外传感器的卫生间自动清洗系统

图 5.55 是利用红外传感器的卫生间自动清洗系统。红外线发光二极管发射的红外线从检测窗(发射和检测共用一个窗口)

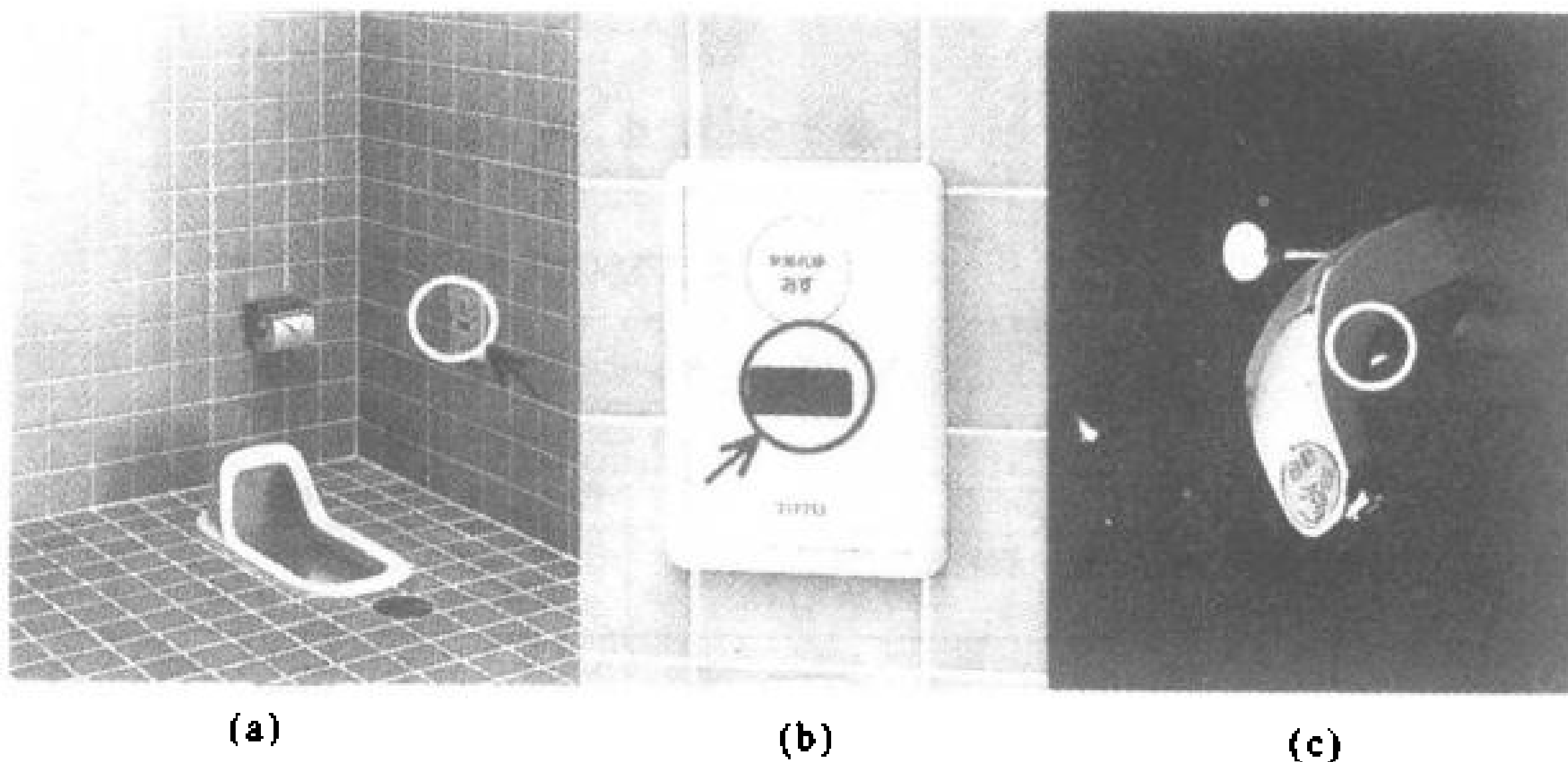


图 5.55 卫生间自动清洗系统

射出。在图 5.55(a)的大便器清洗系统中,光电二极管检测从人身上反射回来的红外线,由检测电路进行判断后,决定是否放水冲洗。图 5.55(b)的水龙头放水系统和图 5.55(c)的烤手机中,当手接近检测窗时,红外线被反射到光二极管上,使它们开始工作。

# 16 光的测量

## □ 要点

电子设备和通信线路已相当普及。光纤的应用使传送媒质从金属变为玻璃,同时也给测量设备带来巨大变化。本章将学习光的知识和光测量仪器。

## □ 解释 ● 光与光缆

光

先来了解一下光的知识。从频率的不同来看交流信号,我们说话时耳朵能听到的声音是低频信号;无线电广播和电视广播的载波是高频、超高频(VHF)、甚高频(UHF)信号;频率继续升高,就到了红外线、可见光、紫外线等光频区。随着频率的升高,周期和波长变短,我们可以把交流信号和光理解成同一类物质(图 5.56)。

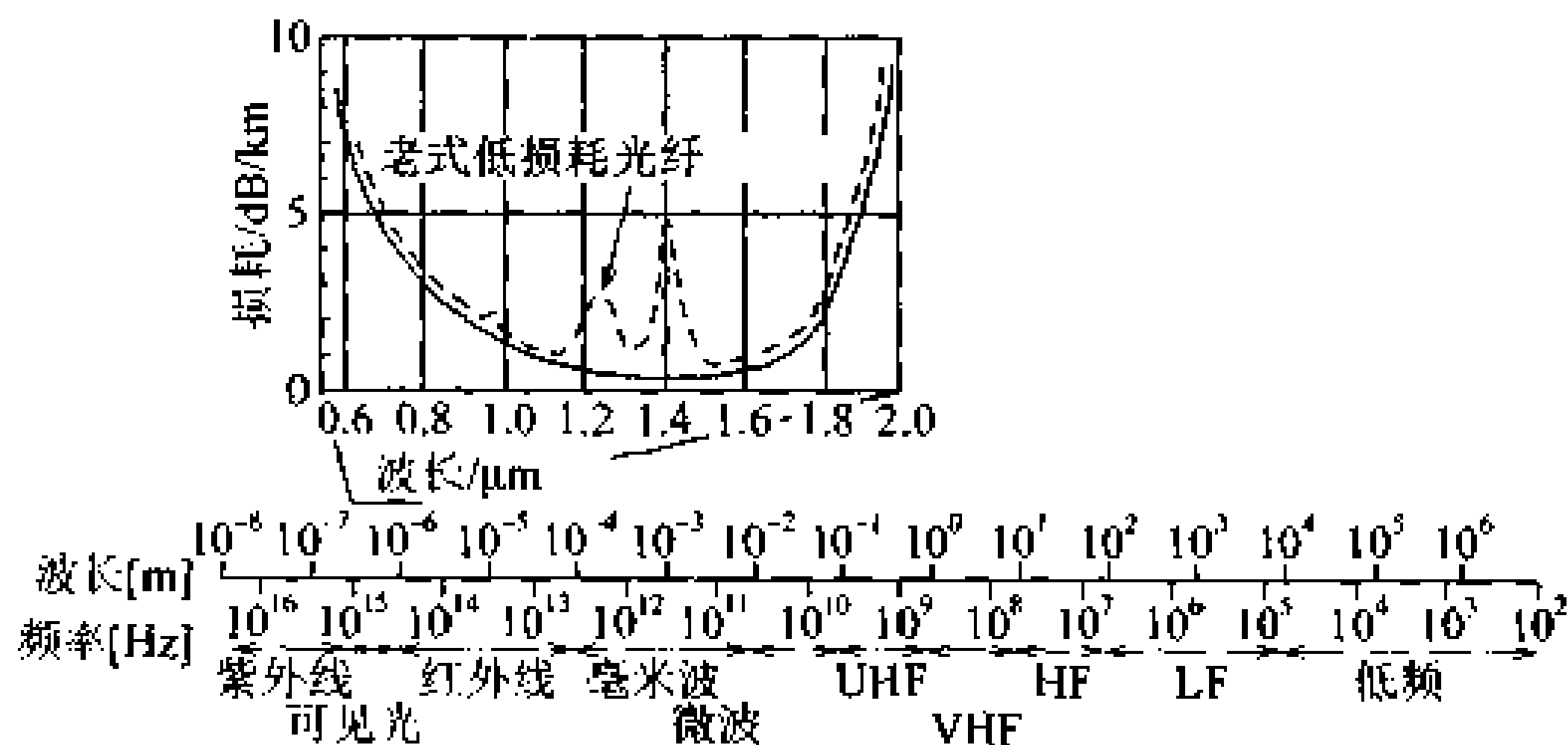


图 5.56 波长特性与频率

### 光缆

光缆是用玻璃纤维制造的,与金属导线相比,它具有损耗小、频带宽、无电磁感应、无串话、高绝缘、直径小、重量轻等优点,在国际电话等传输线路中已经实用化。光通信所使用的波长(频率)决定于光缆的损耗特性。从图 5.56 的特性可以知道,可以利用的波长从  $0.76\mu\text{m} \sim 1.3\mu\text{m}$  以上(近红外到红外线)。与老式光缆相比,OH 基光缆的损耗已改善为图 5.56 中实线所示的特性。通信波长也从较短的区域移向较长的区域,应用传输损耗更小的  $1.55\mu\text{m}$  波段了。

### ● 用于光通信的测量仪器

#### 稳定化光源

光通信中所用的最基本的测量仪器是稳定化光源和光功率



图 5.57 稳定化光源与光传感器



图 5.58 光功率表和光功率传感器

LD  
LED

光功率表

表。图 5.57 为稳定化光源的外观,图 5.58 是光功率表的外观。

稳定化光源是用作测量单波长损耗的光源,用于测量光纤和与光有关的元件的单位损耗。常用的发光元件有 LD(激光二极管或半导体激光器)和 LED(发光二极管)二种类型。LD 的输出功率大,常用于大损耗器件的测量;LED 的输出稳定,常用作精密测量的光源。

光功率表用于测量光通信和激光的功率。它由光功率传感器和指示器组成。光功率传感器对来自 LD 和 LED 的空间传播光或光纤的输出光进行光/电(O/E 转换)转换,指示器把转换成的电信号显示为光功率。



## 17 频谱分析仪

### □ 要点

频谱分析仪是分析接收信号频率成分的测量仪器。该仪器的最大特点是当取横轴为频率、纵轴为电平,它能直接得到信号的频谱图。

### □ 解释

#### ● 频谱分析仪

示波器

图 5.59 是把用示波器和用频谱分析仪观察同一信号时得到的波形画在同一张图上的模式图。被观测信号是一个具有二次谐波的失真正弦波信号。用示波器观察具有谐波失真的信号时,从波形畸变只能知道它不是正弦波而含有高次谐波成分,但究竟是多少次谐波?其大小为多少?都不能定量测知。相反,频谱分析仪则能利用其滤波器将信号分离成各个不同频率的正弦波,并定量地表示成频谱图,这就是频谱分析。由图 5.59 可知,信号是由基波和二次谐波合成的,各成分的振幅大小也可从频谱图上直接读出。

频谱分析

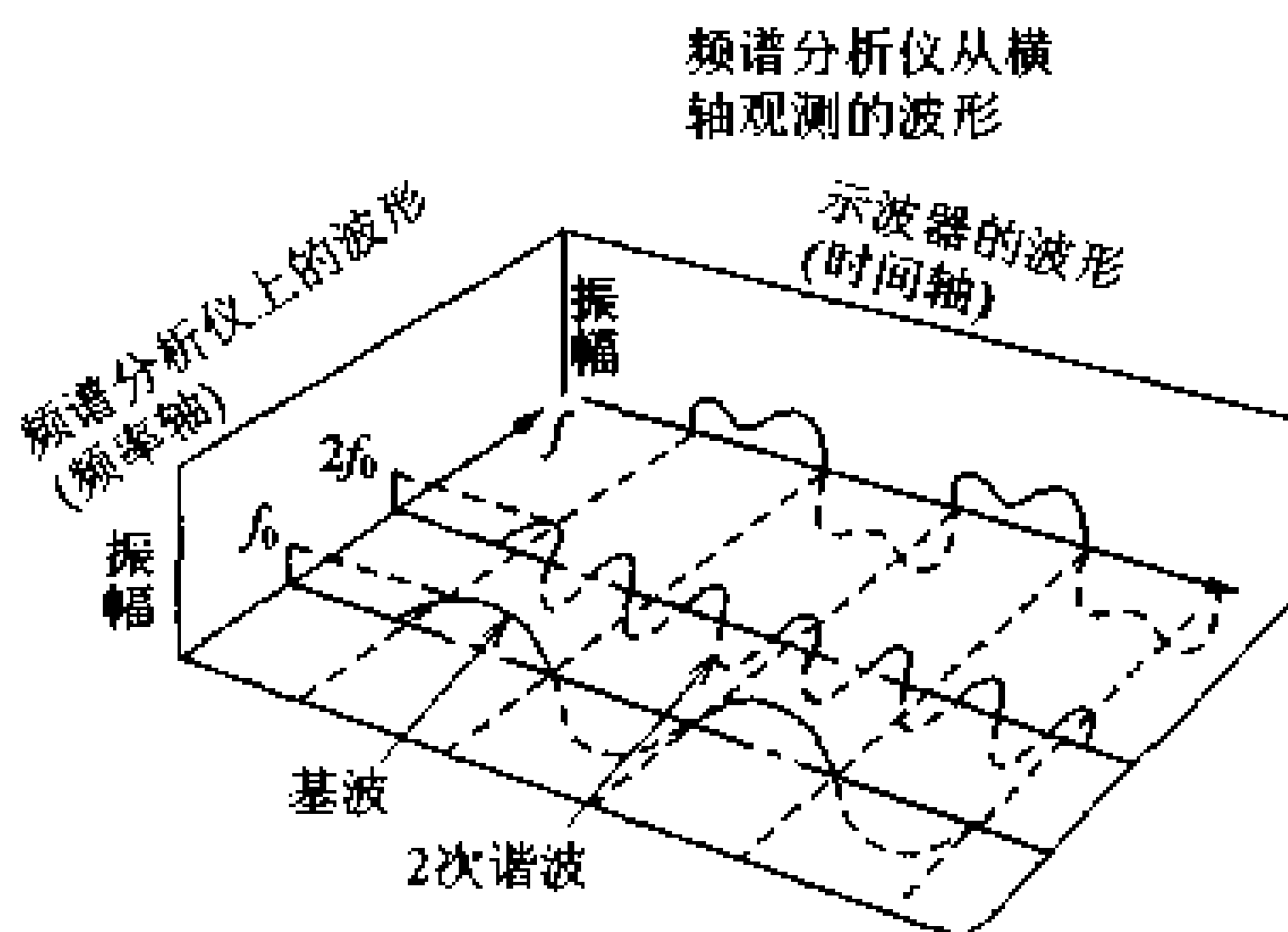


图 5.59 频谱分析仪和示波器

非扫描式  
扫描式

图 5.60 为频谱分析仪的外观图,图 5.61 是它的电路构成。如图 5.62 所示,频谱分析仪有非扫描式和扫描式二种。非扫描式频谱分析仪采用多个窄带滤波器对被测信号进行分离,并能同时求出各滤波器的输出。扫描式频谱分析仪只有一个滤波器,但其中心频随时间而改变,相当于多个滤波器。图 5.61 的电路是扫描式频谱分析仪的电路构成。

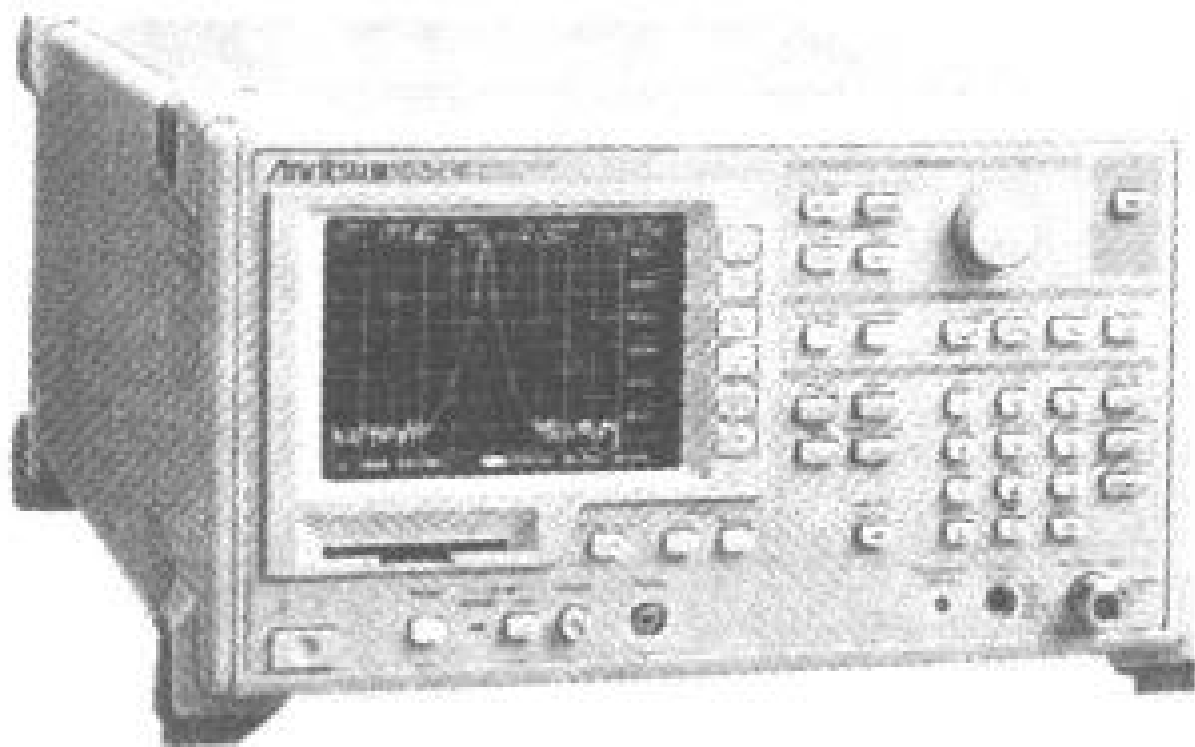


图 5.60 频谱分析仪的外观

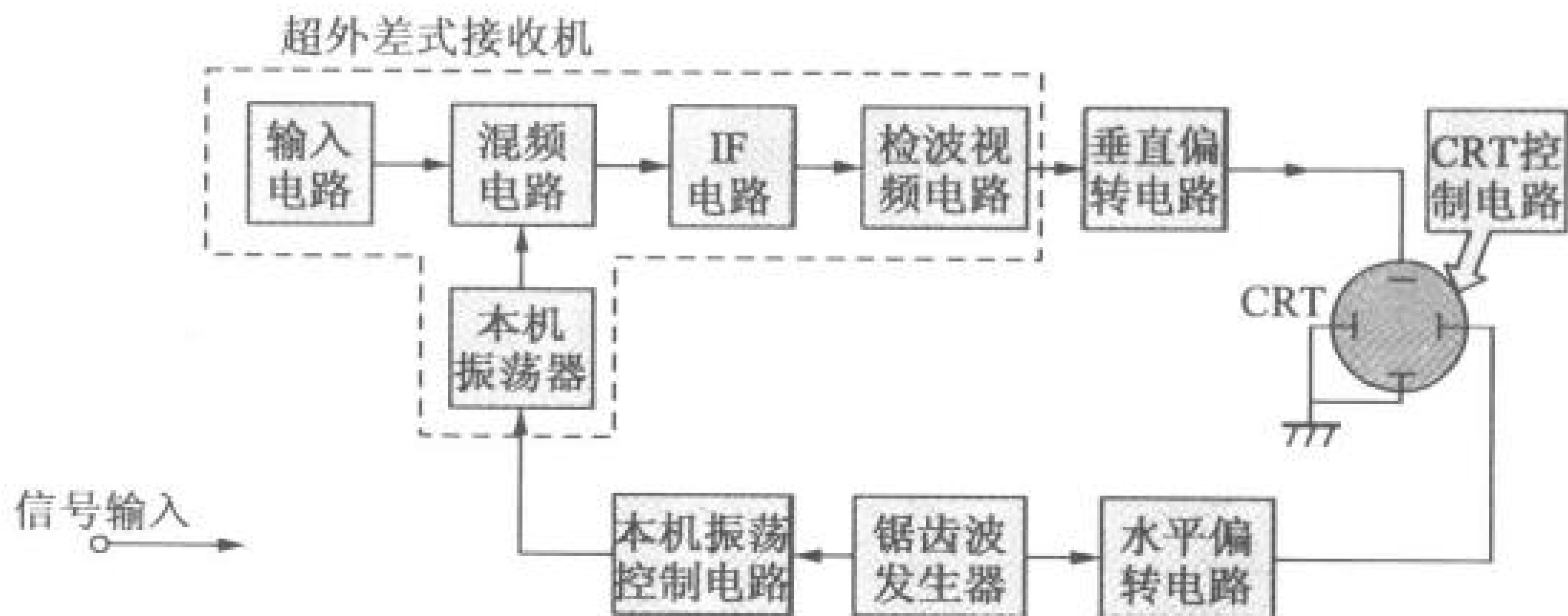


图 5.61 超外差式频谱分析仪的电路构成

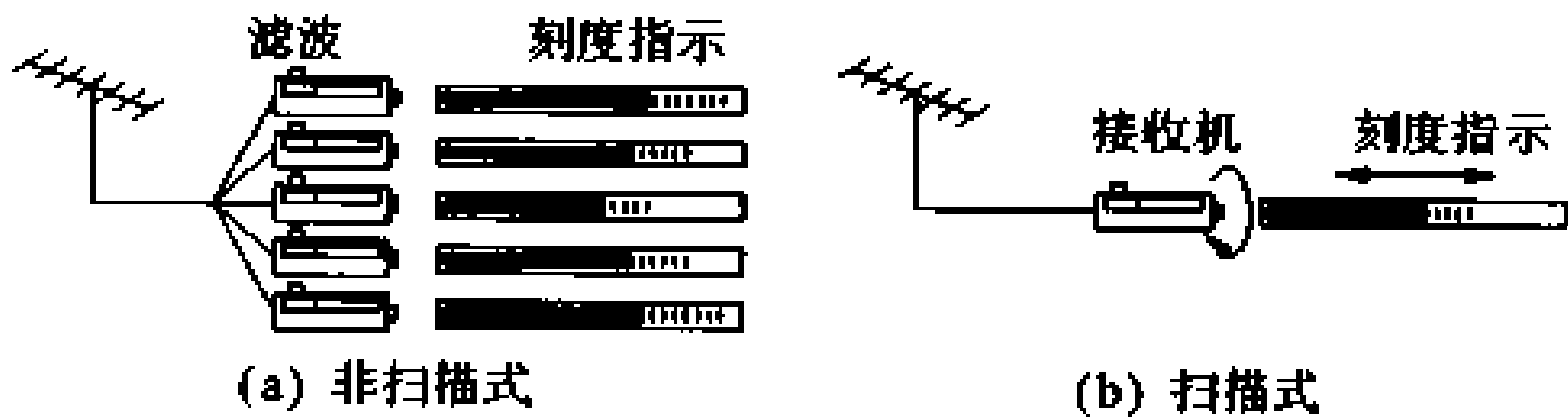


图 5.62 频谱分析仪的原理

频谱分析仪可测量的频率范围为 100Hz~8.5GHz 的信号，其它指标列于表 5.9。

表 5.9 频谱分析仪的主要指标

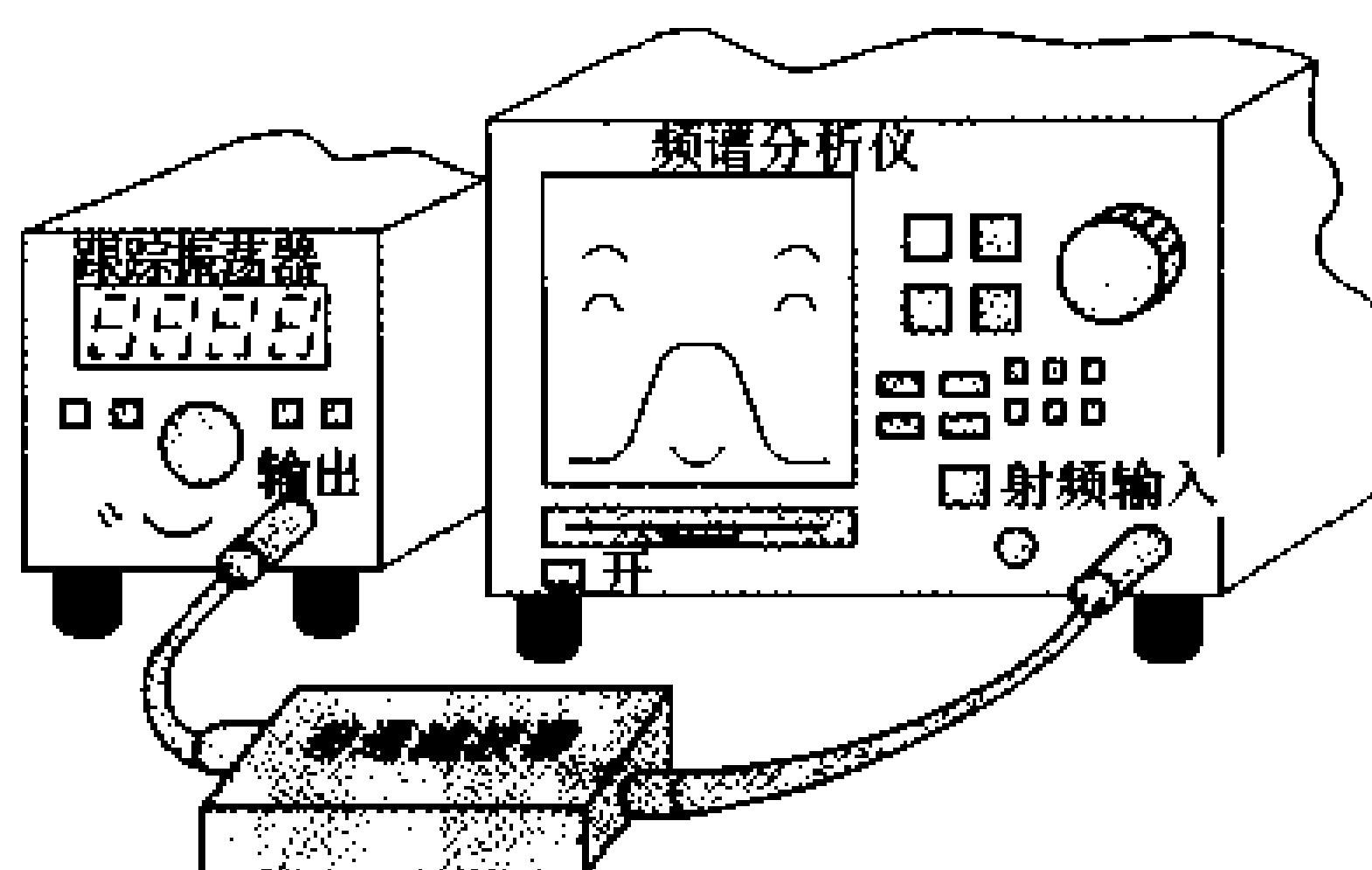
项 目		范 围
频率范围		100Hz~8.5GHz
间隔设定范围		0Hz, 100Hz~8.5GHz
分辨带宽	设定范围	10Hz~3MHz(3dB)
	精 度	±20%
	选择性(60/3dB)	≤15:1(100kHz~3MHz) ≤12:1(10Hz~30kHz)

续表

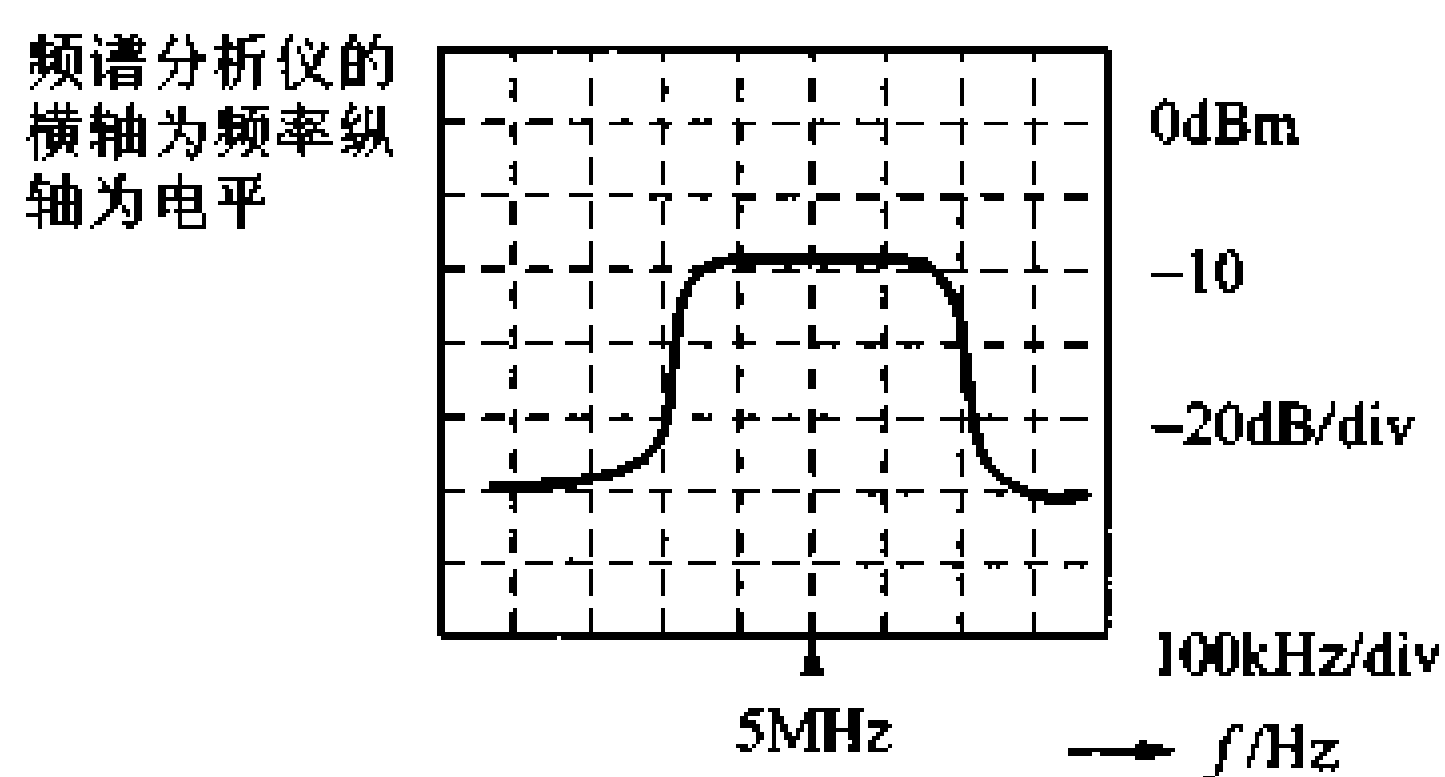
项 目		范 围
电平测量	设定范围	平均噪声电平 $\sim +30\text{dBm}$
	最大输入	连续波平均功率: $+30\text{dBm}$ 直流电压: $0\text{V}$

### 应用基础 用频谱分析仪测量滤波器的频率特性

可用下述方法测量滤波器的频率特性:将振荡器的信号输入到滤波器,再将滤波器输出端与频谱分析仪连接。如果频率范围很宽,显示画面宜用对数坐标,也可在线性频率轴上观测。图 5.63(a)、(b)是测量电路和观测实例。



(a) 滤波器频率特性测量电路



(b) 滤波器的频率特性

图 5.63 频谱分析仪

# 18 FFT 分析仪

## □ 要 点

FFT 分析仪是对输入信号进行快速傅里叶变换来分析频率成分(正弦波)的仪器。它具有频谱分析仪的功能,但频谱分析仪能分析很宽频谱的信号,而 FFT 分析仪只用于分析频谱在 100kHz 以内的信号。

## □ 解 释

傅里叶变换

### ● 傅里叶变换与快速傅里叶变换

傅里叶变换是法国数学家傅里叶发现的理论,该理论认为:不管什么样的信号波形,只要它是周期性的,就都可以分解为不同频率的正弦波和余弦波(图 5.64)。

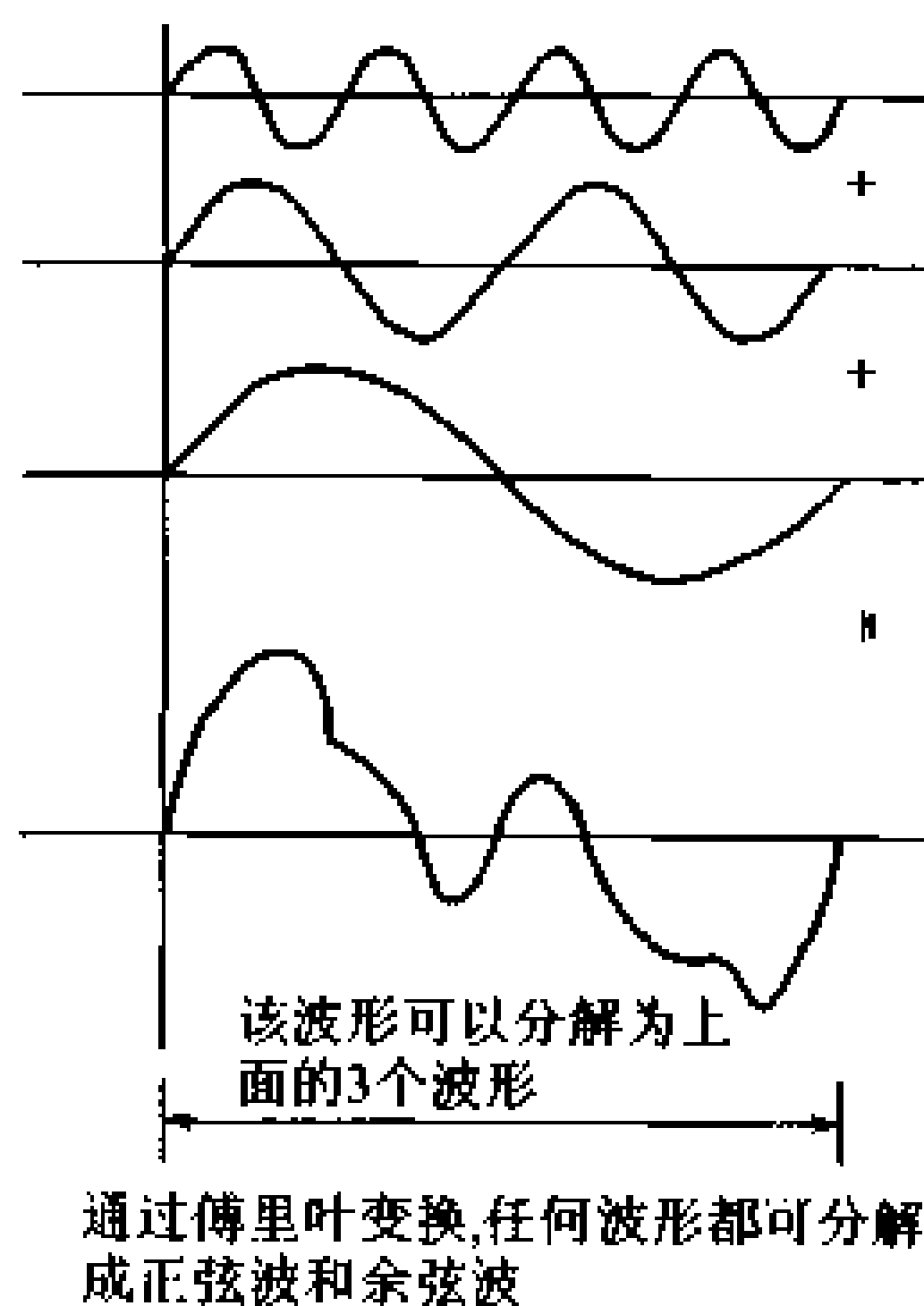


图 5.64 傅里叶变换

例如一个正弦交流电压  $V(t)$  [V] 的数学表达式为

$$V(t) = V \sin(\omega t + \theta) \quad (5.18)$$

以交流电压为例,傅里叶证明了任何电压波形都是(5.18)式所示的正弦交流电压的集合。也就是说,设复杂的信号为  $V_s(t)$  [V], 则它可以用下式的正弦交流电压的集合表示:

$$\begin{aligned} V_s(t) &= V_1 \sin(\omega t + \theta) + V_2 \sin(2\omega t + \theta) + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (5.19)$$

(5.19)式称为傅里叶级数。

## FFT

### 快速傅里叶变换

FFT(fast fourier transform)能大幅提高傅里叶变换运算速度的算法,称为快速傅里叶变换。FFT 在提高数字信号处理速度方面起着重要作用。

### ● FFT 分析仪

#### FFT 分析仪

FFT 分析仪的外观和电路结构分别示于图 5.65 和图 5.66。FFT 分析仪利用 A-D 转换把输入信号变成数字量,然后再进行 FFT 运算处理,并将结果显示在 CRT 显示屏上。

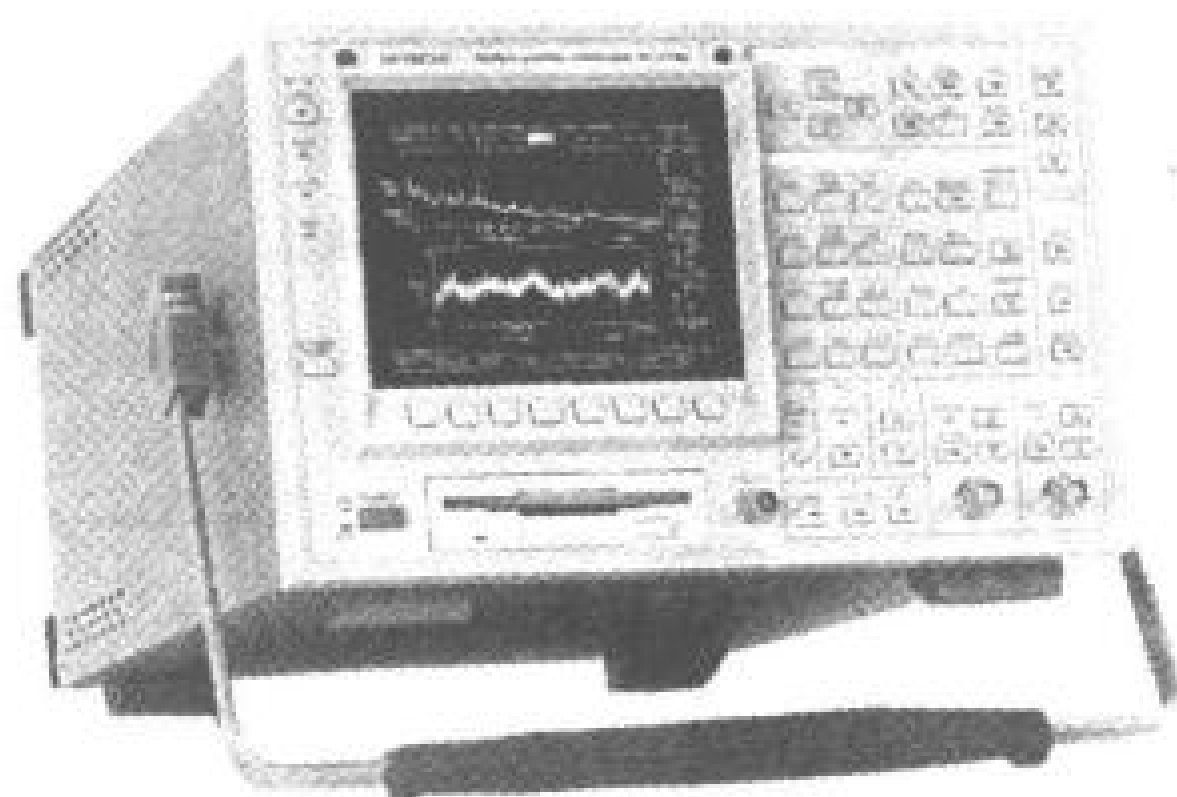


图 5.65 FFT 分析仪的外观

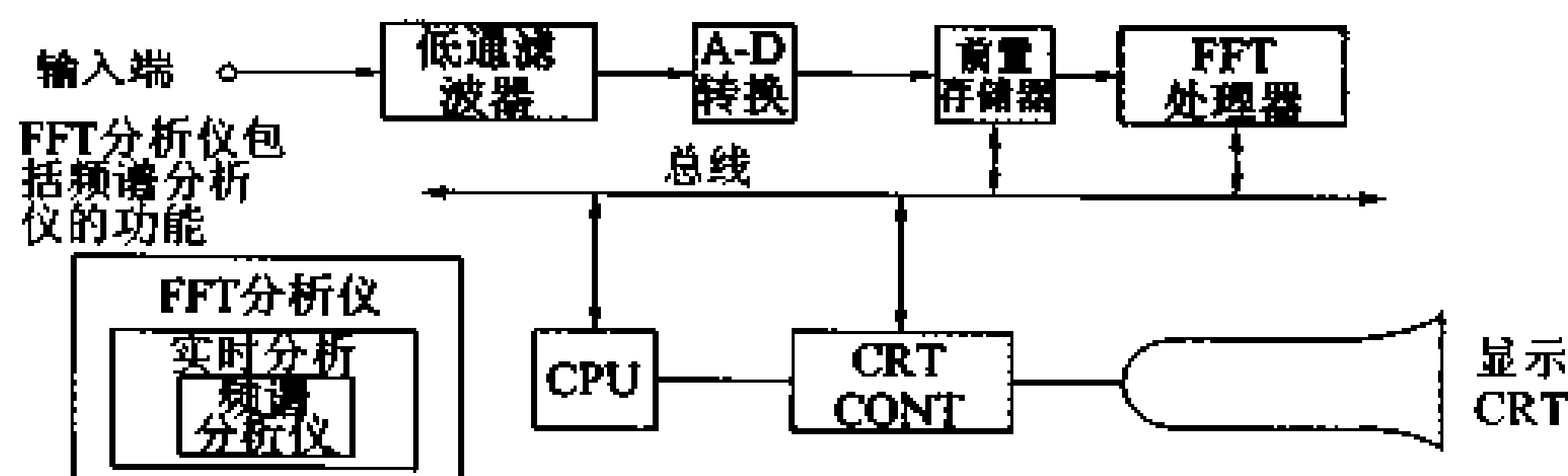


图 5.66 FFT 分析仪

FFT 分析仪具有以下特点:

- ① 运算速度快,能实时显示处理结果;
- ② 精度和频率分辨率高;
- ③ 由于能获得信号的振幅、相位、频率三要素,所以它可以进行傅里叶逆变换,再现输入信号;
- ④ 能测量传递函数、求取均值和相关函数。

FFT 分析仪是与振动分析及音响分析一起发展起来的,从而也与音响传感器和振动传感器一起获得了大量应用。其应用实例如下:

- ① 振动与结构分析；
- ② 音响、噪声和语音的分析；
- ③ 数字、立体声的语音质量评价；
- ④ 设备噪声的评价；
- ⑤ 电话终端设备的评价。

## 相关知识 ● 室内音响性能的测定

测量室内声压分布或门的隔音特性时,可如图 5.67 所示,首先选好基准点,以被测点与基准点声压之差来测定各点的声压。测量声压用的传感器采用噪声测量仪。

噪声测量仪

FFT 分析仪对测得的信号进行倍频程分析后,将数据送给 X-Y 绘图机记录下来。

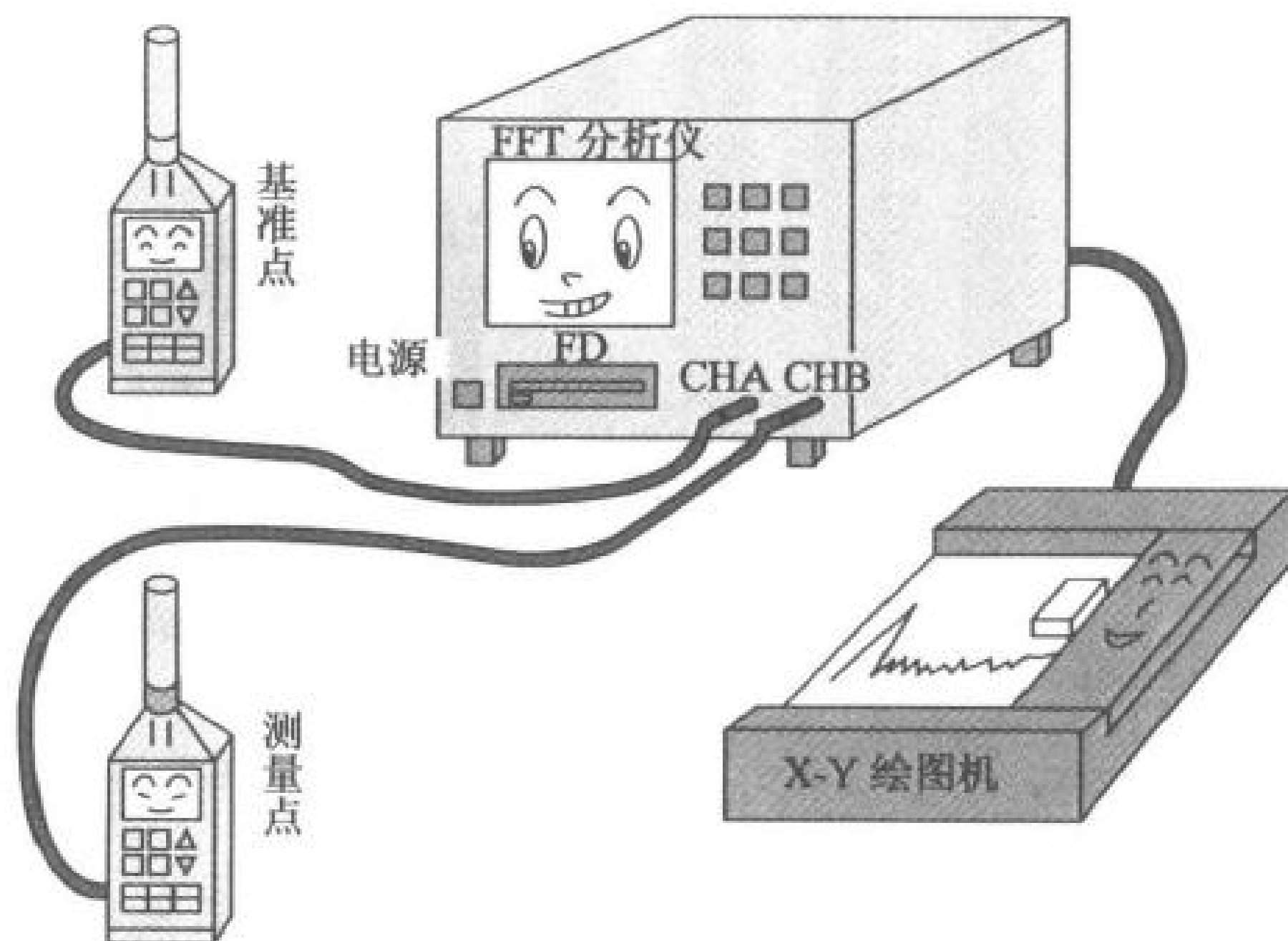


图 5.67 室内音响特性的测定

## 19 各种应用测量

### □ 要 点

应用测量是指测量电学量以外的物理量及化学量。最近,由于计算机硬件技术的发展,能同时测量多种参数的综合测量设备也包括在应用测量中。数字移动无线发射机测试器和网络分析仪都是其中之一。本节就以这两种仪器为例来予以说明。

### □ 解 释 ● 数字移动无线发射机测试仪

图 5.68 是数字移动无线发射机测试仪的外观图。在船用通信设备和小功率无线收发信机向着小型化和数字化迅速发展的进程中,出现了一种数字移动无线发射机测试仪。它是一种只用 1 台仪器就可以评价移动通信发射机各主要特性的测量仪器。



图 5.68 数字移动无线发射机测试仪的外观

该测试仪内部装有频谱分析仪、功率表和标准振荡器等,其频率覆盖范围为  $100\text{Hz} \sim 8.5\text{GHz}$ ,除了能评价发射机的射频信号(射频最大输出  $10\text{W}$ )外,还能快速测量频率、占有带宽、天线功

率、调制精度(相邻频道的泄漏功率、寄生调制)等。

下面稍微介绍一下数字调制的知识。图 5.69 是  $\pi/4\text{QPSK}$  信号的状态图。 $\pi/4\text{QPSK}$  是 PSK (phase shift keying: 相位调制方式)的应用,它是用 4 个调制数据对相对变化了  $\pm 45^\circ$

该状态图是按显示  
屏画的,屏上的线  
是跳动的

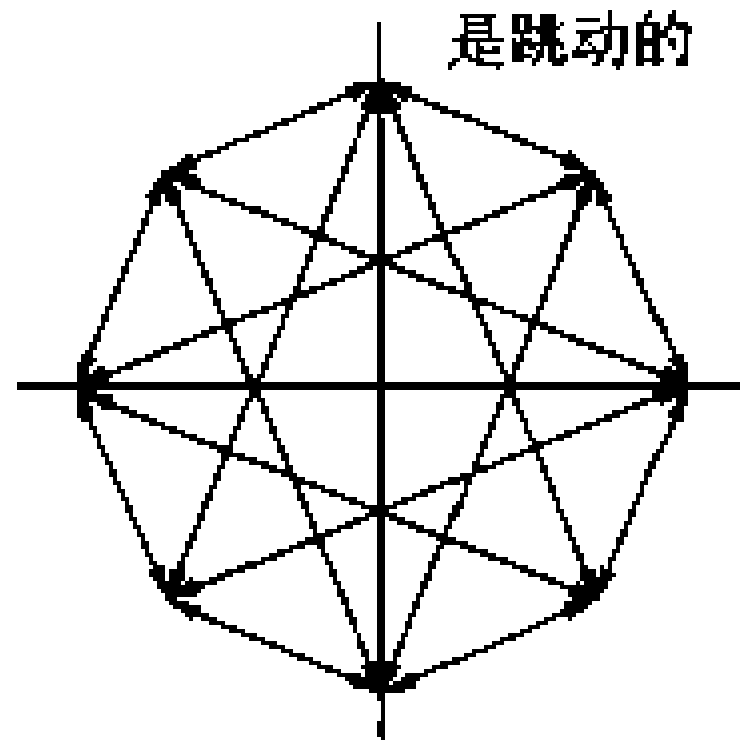


图 5.69  $\pi/4\text{QPSK}$  信号状态图

和±135°的载波进行调制的一种调制方式。用数字移动无线发射机测试仪能观测到这种调制方式的状态,其状态图如图 5.69 所示。

● 网络分析仪

图 5.70 是网络分析仪的外观,表 5.10 列出仪器的主要指标。

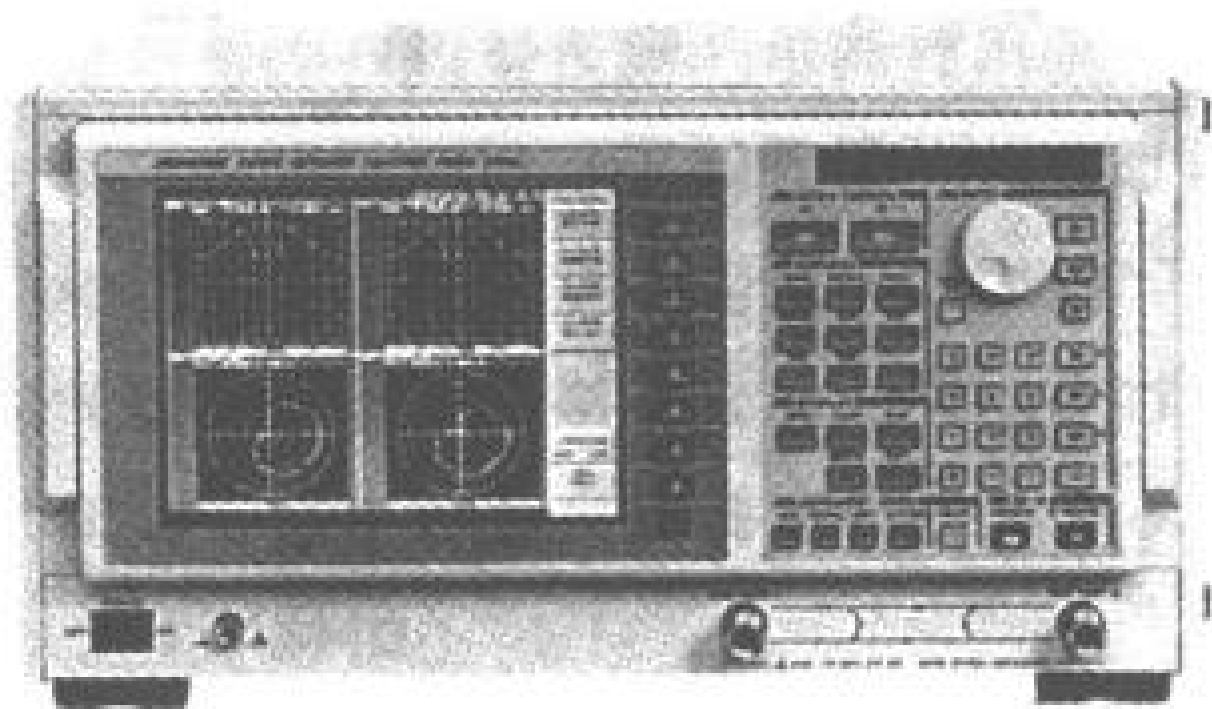


图 5.70 网络分析仪的外观

表 5.10 网络分析仪的主要指标

项 目	范 围
测量频率	40MHz~8.0GHz
分辨率	100Hz
输出电平	+10dBm~-15dBm
分辨率	0.01dB
输入频道	2
输出频道	1
分辨率带宽	10kHz~10Hz(1, 3 档)
动态量程	90dB/3kHz RBW, 100dB/10Hz RBW
动态量程精度	0.05dB
分辨率	0.01dB

网络分析仪基本是测量 2 个信号之间的振幅和相位特性的仪器,用该仪器测得的模拟电路线性工作区传输特性和阻抗特性,几乎能完全地描述模拟电路的特性。所以,无论是电容器、电阻等元器件,还是传输线路中的电路、设备和系统,都能用网络分析仪进行分析。



## 相关知识 ● 用于测试仪器的 GP-IB 接口

### GP-IB 接口

除了模拟仪表之外,为了将数据传给计算机,现在的测量设备几乎都带有接口插座,GP-IB 接口就是其中之一。GP-IB 插座与电缆的连接如图 5.71 所示。GP-IB (general purpose interface bus) 接口是美国 IEEE (美国电气电子工程师协会) 于 1975 年提出的标准化接口,因而也称为 IEEE-488 或 IEEE-IB。它与 RS232C 等其它接口最大的不同是联机数可以多达 15 台,且传输速度比 RS232C 快。

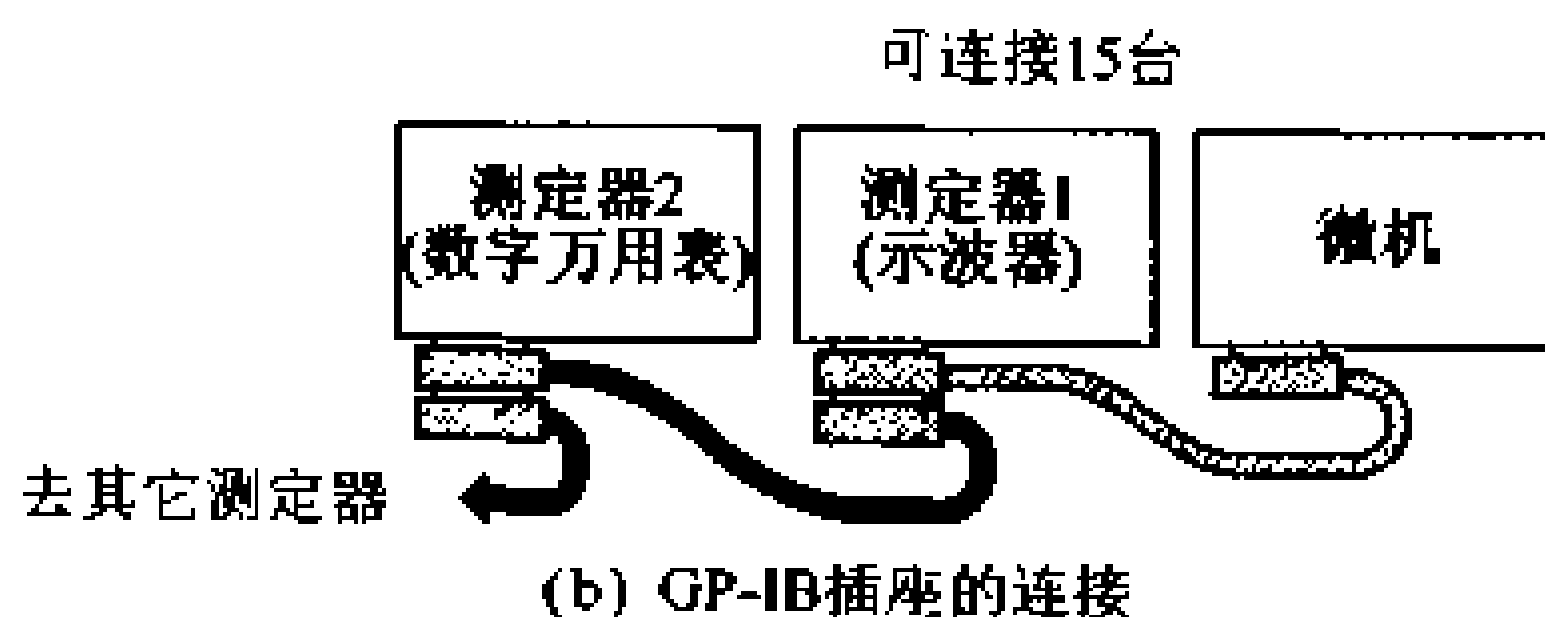
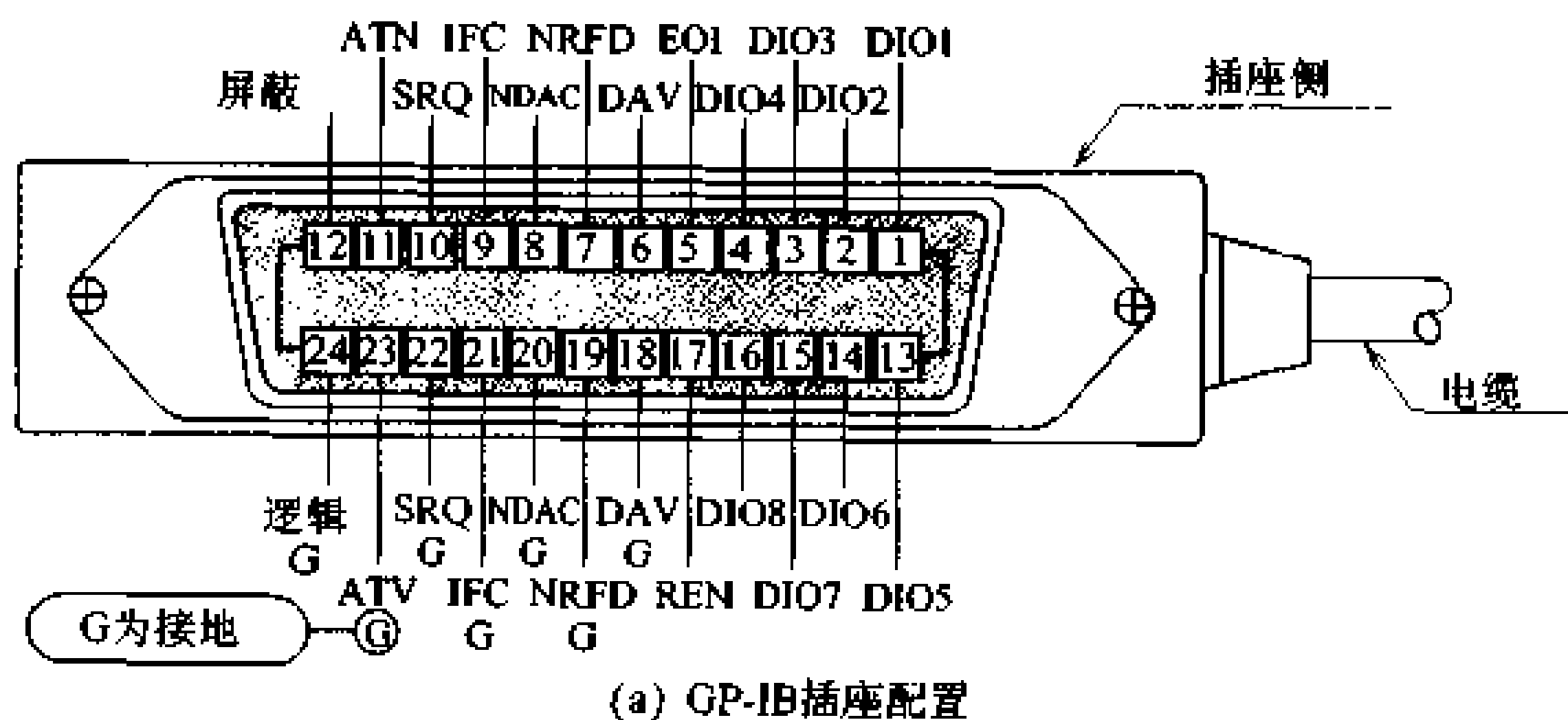


图 5.71 GP-IB 插座与电缆的连接

## 选修知识 从观测波形读取电压最大值和周期

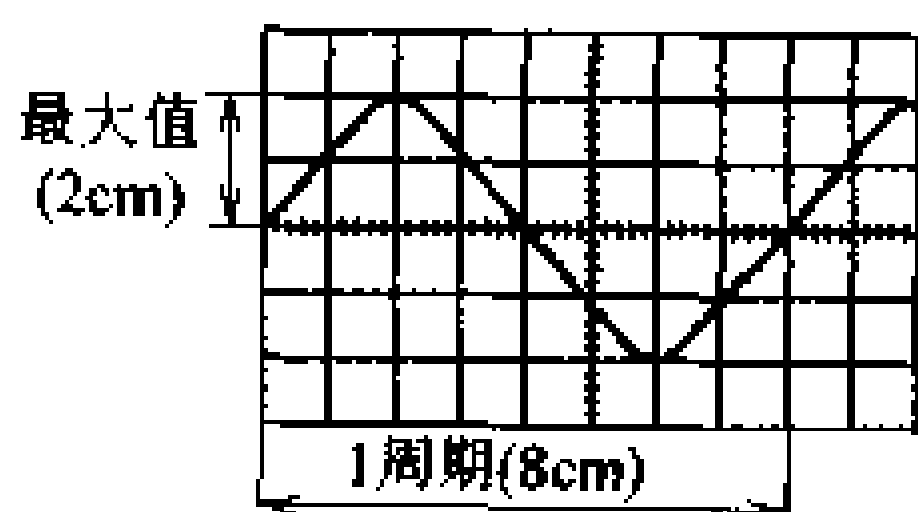


图 5.72 示波器上的观测波形

图 5.72 是示波器观测到的波形。若垂直灵敏度为  $10\text{mV}/\text{div}$ , 即每厘米为  $10\text{mV}$ , 图中波形的最大值为  $2\text{cm}$ , 所以最大值  $V_m$  为

$$V_m = 10\text{mV}/\text{cm} \times 2\text{cm} = 20\text{mV}$$

设扫描时间为  $1\mu\text{s}/\text{div}$ , 即扫描时间为每  $\text{cm}$  代表  $1\mu\text{s}$ , 图中波形的周期为  $8\text{cm}$ , 所以周期  $T$  为

$$T = 1\mu\text{s}/\text{cm} \times 8\text{cm} = 8\mu\text{s}$$

### 医学工程的最前沿

与我们身体健康有密切关系的医疗领域中,也大量使用着电子仪器。它的使用范围十分广泛,例如测量滴液注射速度的装置、X射线检查装置、CT、MRI、超声波诊断装置、超声波手术刀等治疗、手术及维持生命的设备等等。这些电子设备在临床的各个方面都为医生进行诊断和治疗提供了帮助。这里,我们就以超声波诊断装置为例来看一看它的结构及使用方法。

图1是用超声波诊断仪进行观察的例子。泌尿科可用于检查结石,妇产科常用于胎儿的观察。被称作扫描器的探头发射出 $2\text{MHz}\sim 10\text{MHz}$ 的信号,此信号在生物体内受到不同部位的反射,反射信号经CPU处理,形成供医生观察的图像。图2是用该诊断仪拍摄的胎儿图像。从制造方面来看,这些设备都已小型化到适合于普通的诊察室和病房使用了。



图1 用超声波诊断仪进行诊察



(资料提供: AROKA(株式会社))

图2 诊察照片



## 第6章

# 信息技术

信息技术说法很多。它关系到计算机的硬件和软件以及通讯、控制等技术，亦关系到今天高度信息化社会的繁荣。

我们要在这种高度信息化的社会里生活，必须掌握有关计算机结构和运算的基本原理，以及基本软件、应用软件的使用；计算机通讯的构成和使用方法，以及计算机网络等必要的基础知识和技术。

- 责任编辑  
小市直人
- 执 笔  
小市直人(1~12)  
藤牧秀信(13~15)

# 1 计算机结构

## □ 要点

计算机是由五种基本部分构成的,如包括辅助存储部分也可以认为是由六个部分构成的。它与人的功能非常相似。

计算机部件如图 6.1 所示(称为硬件)。为了让这些部件工作,必须要有软件(程序),这种软件称为操作系统(OS),它是由控制程序和处理程序构成的。控制程序是 OS 的核心,能以高效处理来进行管理,处理程序是完成用户要求工作的支持程序。此外,还有用户自身为了进行数据处理而编制的用户程序。

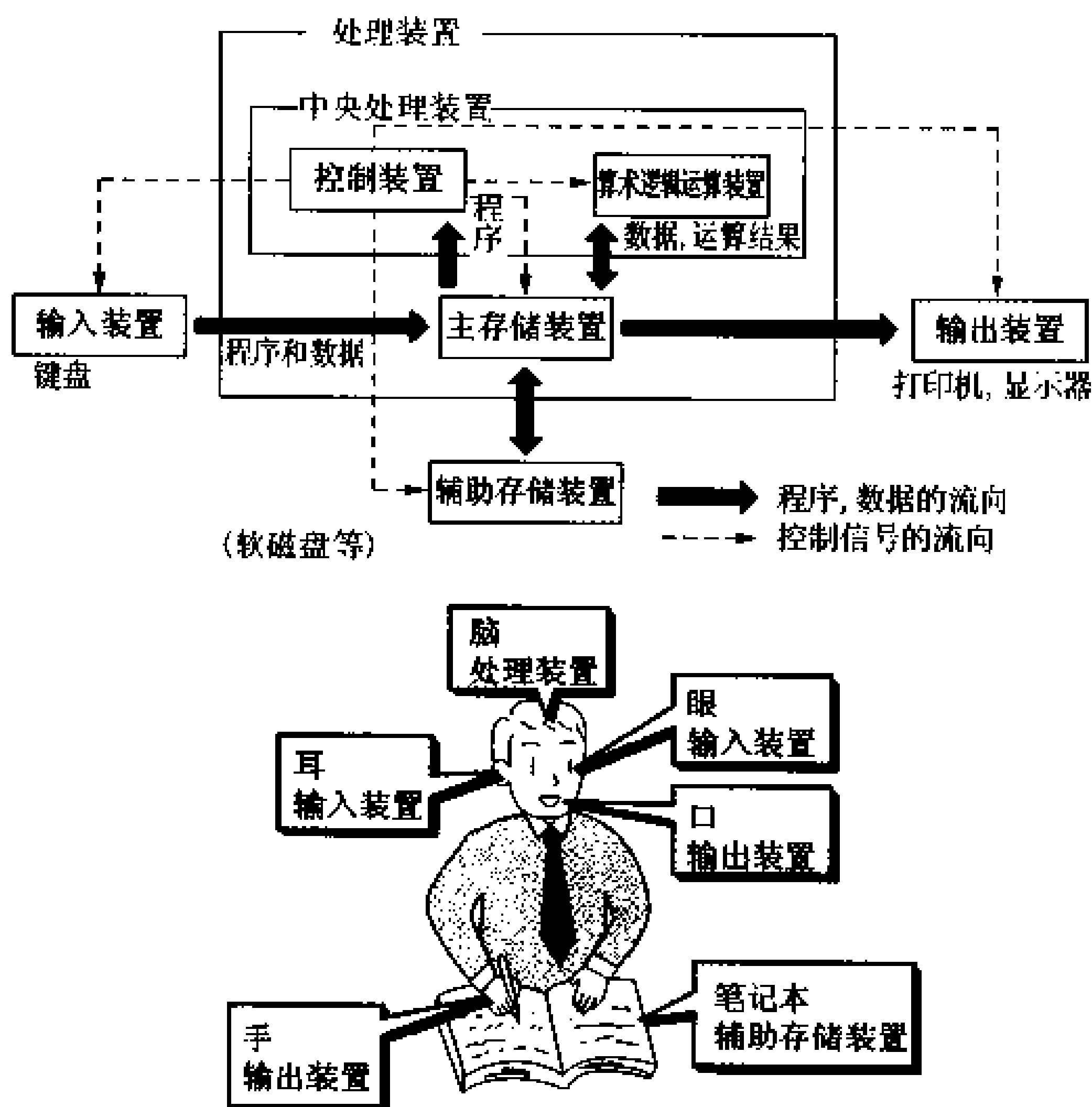


图 6.1 计算机的结构

## □ 解释 ● 计算机的基本结构

控制部件  
算术逻辑运算  
部件  
主存储部件

计算机如图 6.1 所示,是由控制部件、算术逻辑运算部件、主存储部件、输入以及输出部件构成的。将这些部件称作计算机的五大部件。其中的控制部件、算术逻辑运算部件和主存储部件是

输入以及输出  
  部件  
处理部件  
外部设备  
中央处理器

计算机的主体(相当于人的大脑),这些部件统称为处理部件。处理部件以外的输入输出部件和辅助存储部件称为外部设备。此外,又称控制部件和算术逻辑运算部件为中央处理器(CPU)。下面简单说明计算机系统的工作过程。

  输入部件输入的程序和数据装入主存储部件后,程序指令就被送入控制部件,指令在控制部件里被解读(译码),并变成控制信号。然后将这些控制信号送入各有关部件以控制处理工作的逐步进行。

  与此同时,送入算术逻辑运算部件的数据在其中被进行处理,并将处理结果存入主存储部件,最后经显示器等输出部件显示输出。这一系列处理都是根据来自控制部件的控制信号进行的。

□ 相关知识  
  程序内藏式

- 诺曼(Neumann)式计算机
- 程序内藏式(也叫依次处理式)计算机是由在美国的普林斯顿高等研究所工作的佛·诺曼(1903~1957)提出的。这种方式是将程序存储在计算机的存储装置里,并将存储的程序按处理顺序执行。也称这一方式为诺曼方式。现在的计算机都采用这一方式。
- 用户程序的编制步骤
- ① 编制求解所给问题的一系列处理步骤。称这一处理步骤为算法。算法里一定要有处理的开始和终了。
- ② 以算法为基础绘制流程图。
- ③ 沿着流程图的流向用计算机能够理解的语言写出指令。称上述过程为编码。这一系列指令的集合就是程序。

算法  
流程图  
  
编码  程序

## 2 控制装置和算术逻辑运算装置

### □ 要 点

控制装置是由各种寄存器、计数器及译码器等构成的。它是将存储在主存储装置中的程序命令依次取出并译码,然后向各装置给出所需的信号以使计算机能自动连续进行处理的控制装置。

算术逻辑运算装置是根据来自控制装置的指令进行算术运算(四则运算)和逻辑运算(AND、OR 及 NOT 等)的装置。它由作为核心的加法器、补码器、累加器及各种寄存器构成。

### □ 解 释 ● 控制装置

控制装置的功能概况如图 6.2 所示。

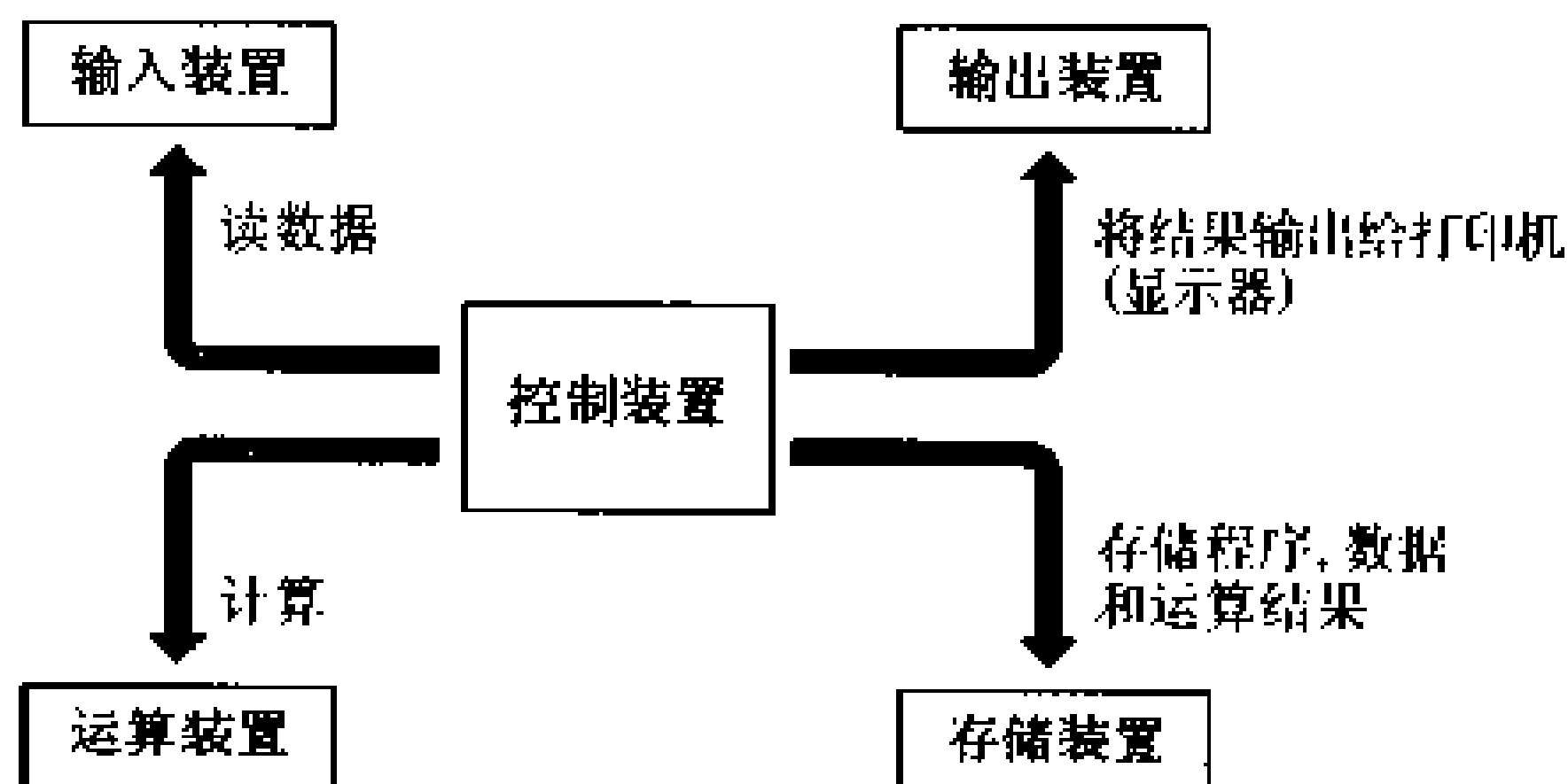


图 6.2 控制装置的功能

让计算机进行工作的仅仅是根据二进制代码编制的机器语言。将程序变换成机器语言的指令并存储在主存储装置里。控制装置将这些机器语言的一系列指令一条一条地取出进行编译,变成控制信号以控制计算机系统。控制装置是由下述各种装置构成的。

#### 指令寄存器

**指令寄存器(instruction register):**是为了执行从存储装置取出的指令,临时进行存储的寄存器。

#### 指令地址寄存器

**指令地址寄存器(instruction address register):**也叫程序计数器或顺序控制计数器。它寄存主存储装置里存储的指令字的地址。执行一条指令后,它就变成下一条要执行的指令的地址。字长固定时,加 2;字长可变时,只加指令字的长度。

#### 变址寄存器

**变址寄存器(index register):**也叫指示寄存器。是在进行地址修改或计数时所使用的寄存器。它指示变址寄存器的内容与指

令字的地址值之和,为所指向的处理对象的执行地址。

### 指令译码器

指令译码器(instruction decoder):也叫译码器。它将指令寄存器中取出的指令进行译码之后,编译成对应于不同指令的控制信号。

## ● 算术逻辑运算装置

算术逻辑运算装置是由如下各种部件构成。

### 补码器

① 补码器:关于补码已在第四章介绍过。计算机的运算以加法为中心。例如,计算 $8-5$ 时,计算机是把它改成 $8+(-5)$ 的形式来求解的。求取 $(-5)$ 的部件就是补码器(complemented)。

### 移位寄存器

② 各种寄存器:运算中存储必要的的数据或运算结果。其主要的寄存器有移位寄存器和标志寄存器等。移位寄存器在有移位信号输入时将指定位的内容左右移位,它能提高乘法、除法等运算的效率。而标志寄存器指示运算结果是正是负或是0,或者是否有位溢出等。

### 标志寄存器

### 累加器

③ 累加器:临时存储四则运算和逻辑运算等结果的寄存器。当累加器中已存有某一数值时,若再有其它数值输入,则累加器的内容将换成此两个数之和。这种累加器也叫累算器。

## □ 相关知识 ● 输入字符的二进制变换

当从键盘上输入字符{A}时(如图6.3所示),是将{A}变换成2进制数后进行存储。这种变换是以字符代码表为基础进行变换的(表6.1)。

## ● 地 址

在计算机的存储器里地址是顺序编排的。某处存储有某单元信息时,地址就是识别这个信息存储在哪里的识别编号。

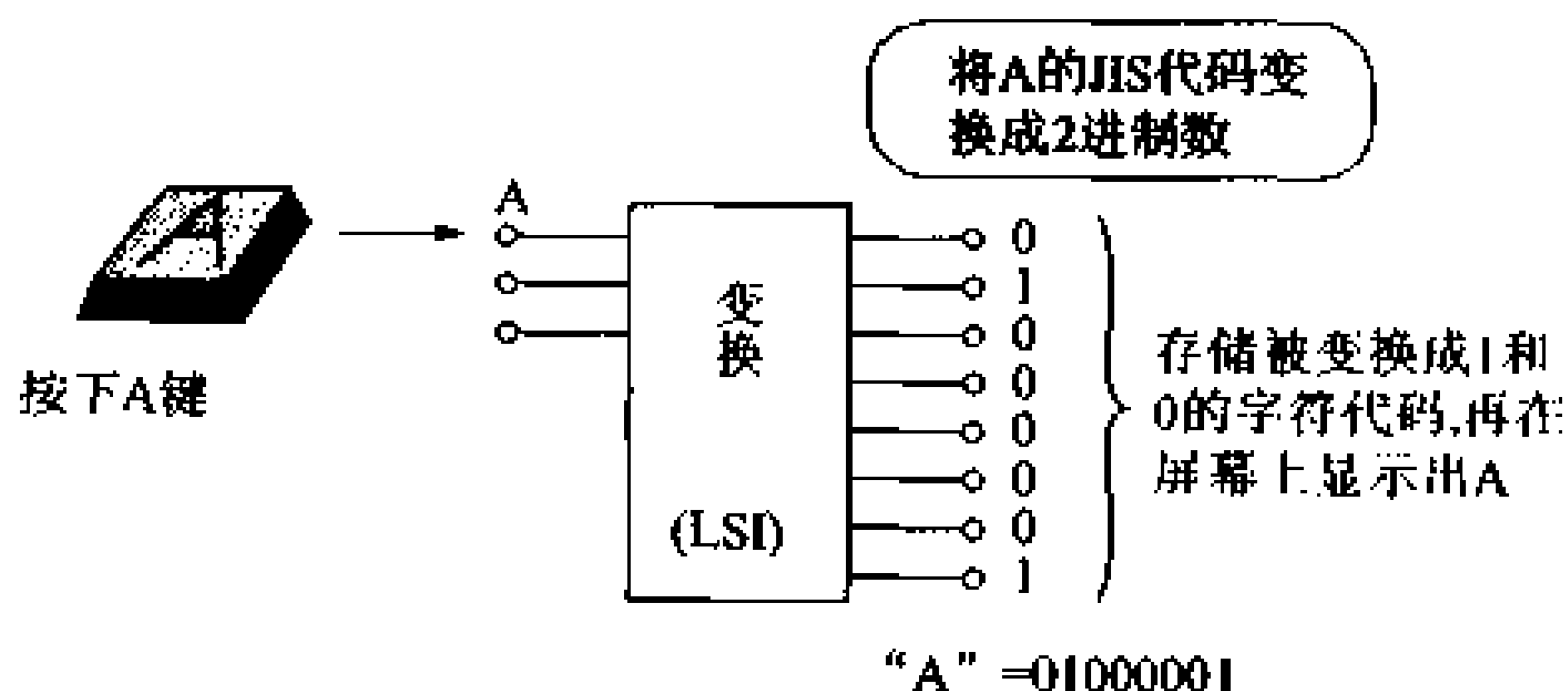


图 6.3 键盘输入字符的变换



表 6.1 JIS 8 比特代码(字符代码表)

					b <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
					b <sub>6</sub>	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
					b <sub>5</sub>	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
					b <sub>4</sub>	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
b <sub>3</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	列 ff	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	
0	0	0	0	0	NUL	TC <sub>7</sub> (DLE)	SP(%)	0	@	P	,	p	↑	↑	未定義	—	タ	ミ	↑	↑	
0	0	0	1	1	TC <sub>1</sub> (SOH)	DC <sub>1</sub>	!	1	A	Q	a	q	↑	↑	↑	ア	チ	ム	↑	↑	
0	0	1	0	2	TC <sub>2</sub> (STX)	DC <sub>2</sub>	"	2	B	R	b	r	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
0	0	1	1	3	TC <sub>3</sub> (ETX)	DC <sub>3</sub>	#	3	C	S	c	s	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
0	1	0	0	4	TC <sub>4</sub> (EOT)	DC <sub>4</sub>	\$	4	D	T	d	t	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
0	1	0	1	5	TC <sub>5</sub> (ENQ)	TC <sub>8</sub> (NAK)	%	5	E	U	e	u	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
0	1	1	0	6	TC <sub>6</sub> (ACK)	TC <sub>9</sub> (SYN)	&	6	F	V	f	v	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
0	1	1	1	7	BEI	TC <sub>10</sub> (ETB)	'	7	G	W	g	w	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
1	0	0	0	8	FE <sub>0</sub> (BS)	CAN	(	8	H	X	h	x	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
1	0	0	1	9	FE <sub>1</sub> (HT)	EM	)	9	I	Y	i	y	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
1	0	1	0	A	FE <sub>2</sub> (LF)	SUB	*	:	J	Z	j	z	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
1	0	1	1	B	FE <sub>3</sub> (VT)	ESC	+	;	K	L	k	{	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
1	1	0	0	C	FE <sub>4</sub> (FF)	IS <sub>1</sub> (FS)	,	<	L	Y	l		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
1	1	0	1	D	FE <sub>5</sub> (CR)	IS <sub>3</sub> (GS)	—	—	M	]	m	~	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
1	1	1	0	E	SO	IS <sub>2</sub> (RS)	.	>	N	^	n	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
1	1	1	1	F	SI	IS <sub>1</sub> (US)	/	?	O	_	o	DEL	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	

注:见 JIS C 6220

## ● 指令字的格式

指令部分  
地址部分

启动运算部件和存储部件的指令是机器语言。指令的格式是由指令部分和地址部分构成的(图 6.4)。指令部分给出输入输出、四则运算以及数据传送等命令,地址部分则给出指令对象的数据在存储部件里的地址。

## ● 地址指定

当只处理计算机机器语言水平概念上的高级语言时,地址指定关系不大。而在汇编程序时,则非常重要。指令是计算机进行数据处理的类型,而地址则决定该指令处理的对象。

## ● 直接地址指定

直接地址指定

图 6.5(a)的地址部分,直接指定数据存储地址的方式称为直接地址指定(direct addressing)。

## ● 间接地址指定

图 6.5(b)的地址部分,指定数据存储单元的入口地址的方式

间接地址指定

称为间接地址指定。

● 即时地址指定

图 6.5(c)的地址部分的内容不是存储数据的主存储装置的地  
址,而是直接作为处理对象的数据本身,这种指定方式称为即时  
地址指定(immediate addressing)。

即时地址指定

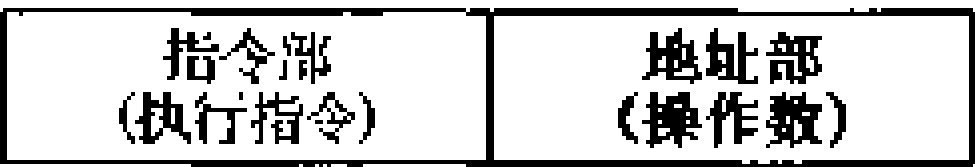
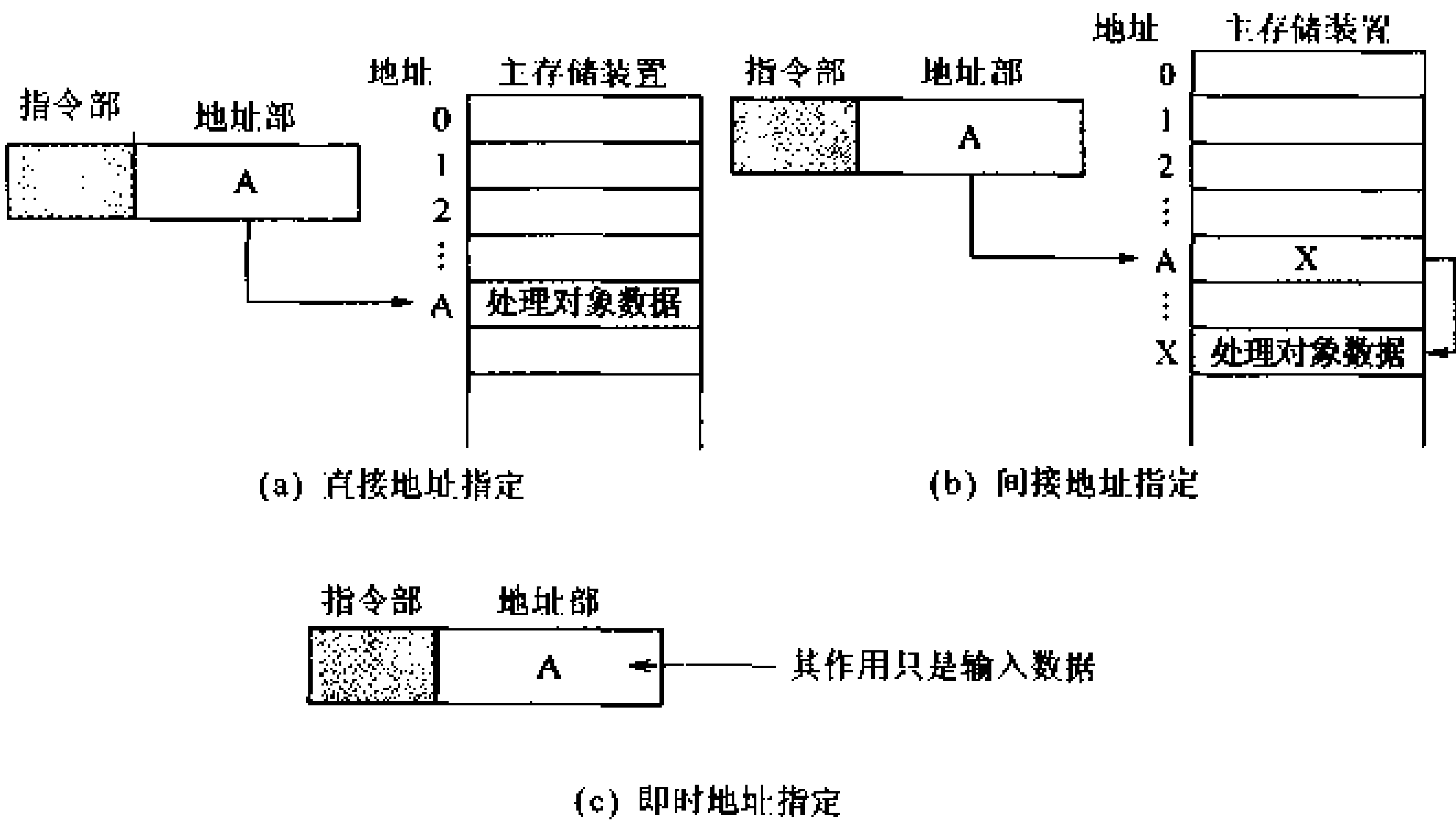


图 6.4 指令字格式



指令部

地址部

地址

主存储装置

0

1

2

⋮

A

X

⋮

X

处理对象数据

(b) 间接地址指定

指令部

地址部

其作用只是输入数据

(c) 即时地址指定

图 6.5 地址指定方式

### 3 主存储装置

#### □ 要 点

存储装置的能力是由存储容量和读写速度决定的。存储容量一般用 2 进制字节(byte)数表示,读写的快慢是用存取时间和循环时间来表示。

主存储装置中存储的程序和数据是由中央处理装置进行存取的。与辅助存储装置相比其存取时间短,但存储容量小。过去使用磁芯作存储元件,现在随着半导体技术的进步,则使用 LSI 和 VLSI 等半导体存储器。

#### □ 解 释 ● 主存储装置的构成

主存储装置如图 6.6 所示,是由存储数据的主存储器、存放存储器地址的存储器地址寄存器和在输入输出装置与中央处理装置之间交换数据的存储寄存器等构成的。

RAM

ROM

存储器件有能够自由读写的随机存储器 RAM(random memory)和只能读出的只读存储器 ROM(read only memory)。主存储装置的存储器件是由 RAM 构成的。半导体存储器件的分类如下。

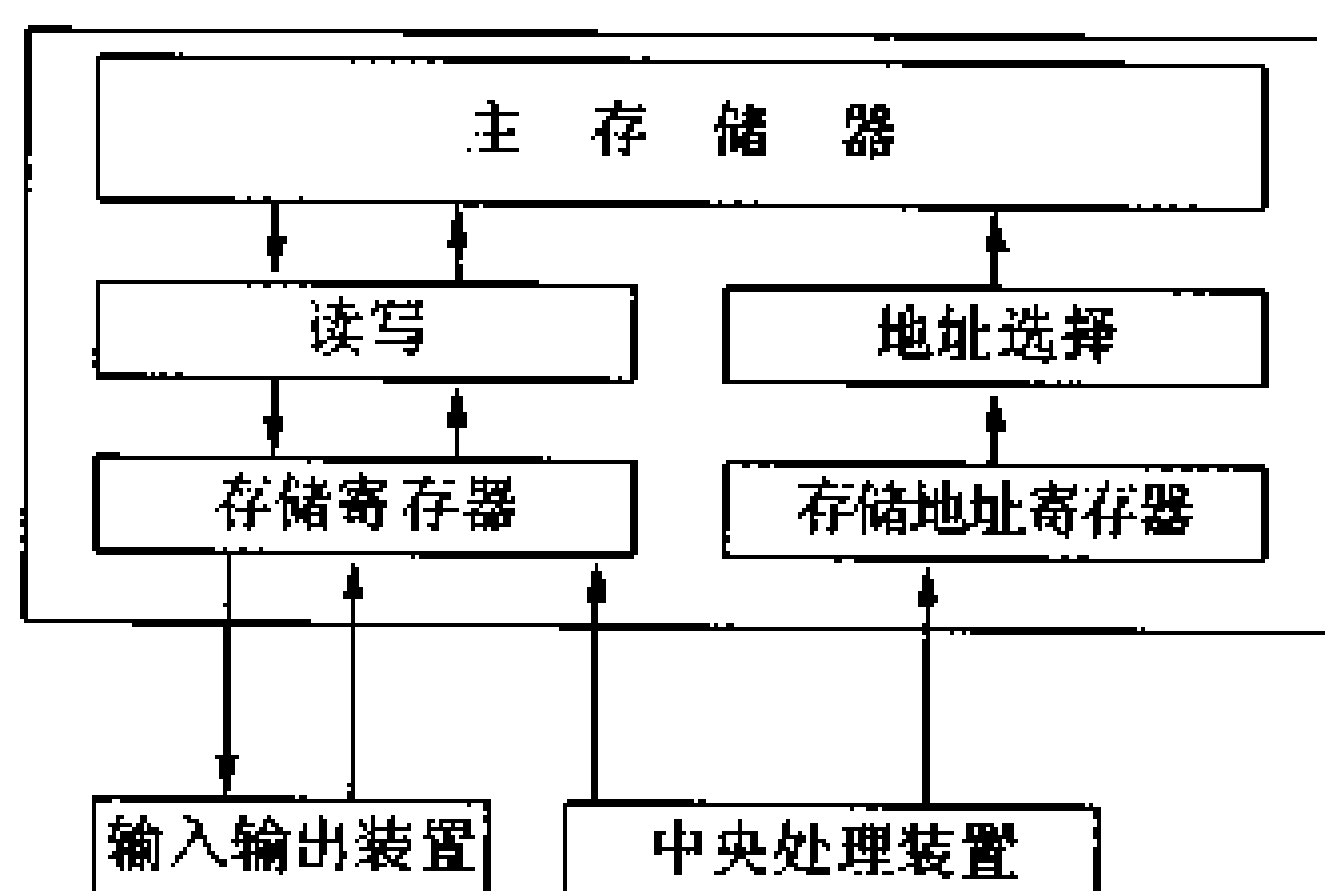


图 6.6 主存储装置的构成

#### ● 静态 RAM(S-RAM)

静态 RAM 是由几个双稳态多谐振荡电路组合成的存储器件。电源一断开,存储内容就会消失。这样的存储装置亦称为挥发性存储装置。

#### ● 动态 RAM(D-RAM)

动态 RAM 是为了将存储内容保存一段时间而使用的存储器

件。动态 RAM 其电路构成复杂,但是因为价格低容量大,所以在个人计算机等中普遍使用。

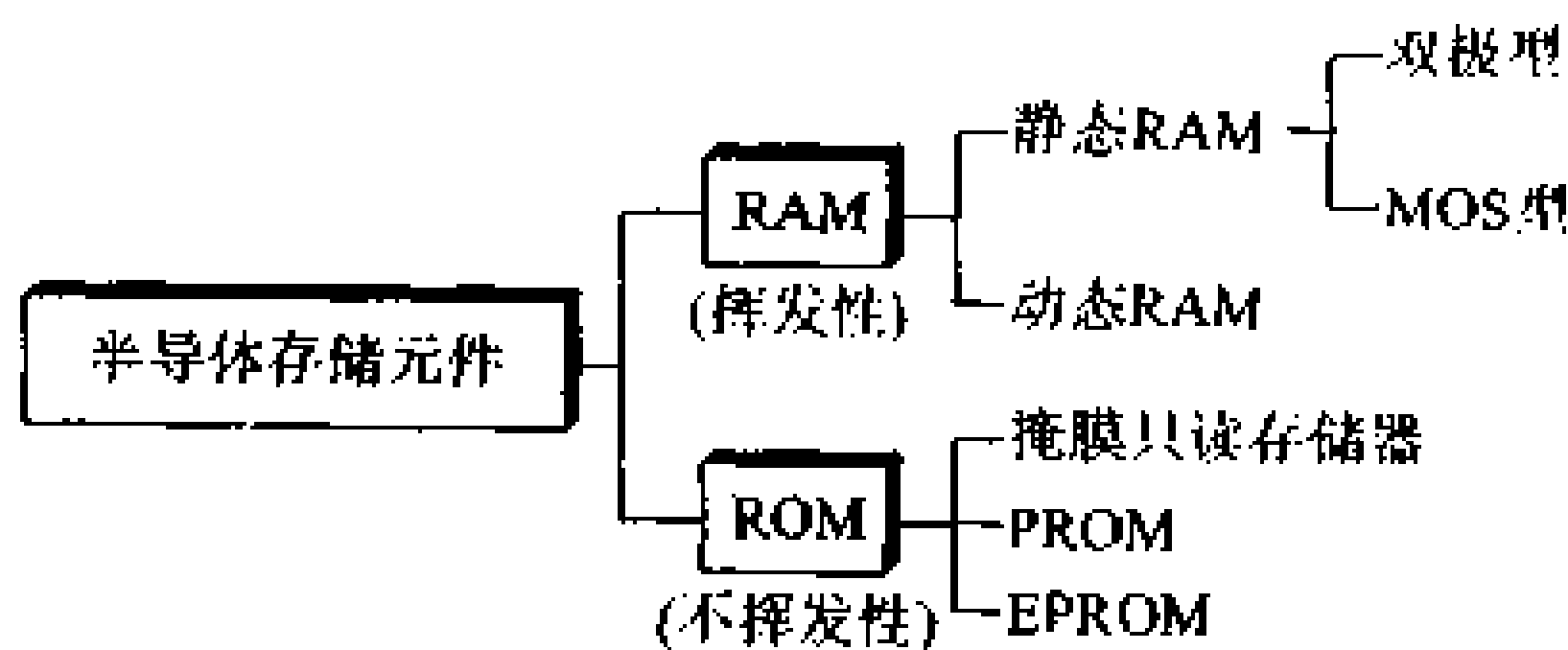


图 6.7 半导体存储元件的分类

## □ 相关知识 ● 主存储器

主存储器(main memory)附有地址,可按照程序中指定的地址进行数据读写。另外,存储器的容量随计算机而异,其单位为字节。

### ● 存储地址寄存器

中央处理装置指定主存储器数据的存储地址,为了临时存放上述地址而使用的存储器即为存储地址寄存器(memory address register)。

### ● 存储寄存器

存储寄存器(memory register)是在输入输出装置与中央处理装置之间临时寄存数据的存储器。

### ● 循环时间

循环时间(cycle time)是指主存储装置中,从进行数据的读写到准备好接受下一个指令的时间。例如,8MHz 的微处理器的循环时间(机器周期)为  $1/8\text{MHz}=125\text{ns}(10^{-9}\text{s})$ 。

### ● 存取时间

存取时间(access time)是指从指令发出到实际得到数据的时间。计算机的这个时间越短,处理速度越快。这个存取时间亦称为指令时间。

## 4 中央处理装置的基本工作

### □ 要 点

中央处理器(CPU)是计算机的心脏。它是由算术逻辑运算部件和控制部件构成的。它把存储在主存储器里的指令输入到指令寄存器里,然后一边解释一边执行。通常所说的 CPU 指的是大型机,个人计算机的 CPU 亦称为 MPU(micro processor unit)。

### □ 解 释 ● 中央处理器的基本动作

如图 6.8 所示,其基本动作是以中央处理器为中心完成处理,是反复进行指令读取和指令执行进行处理的。

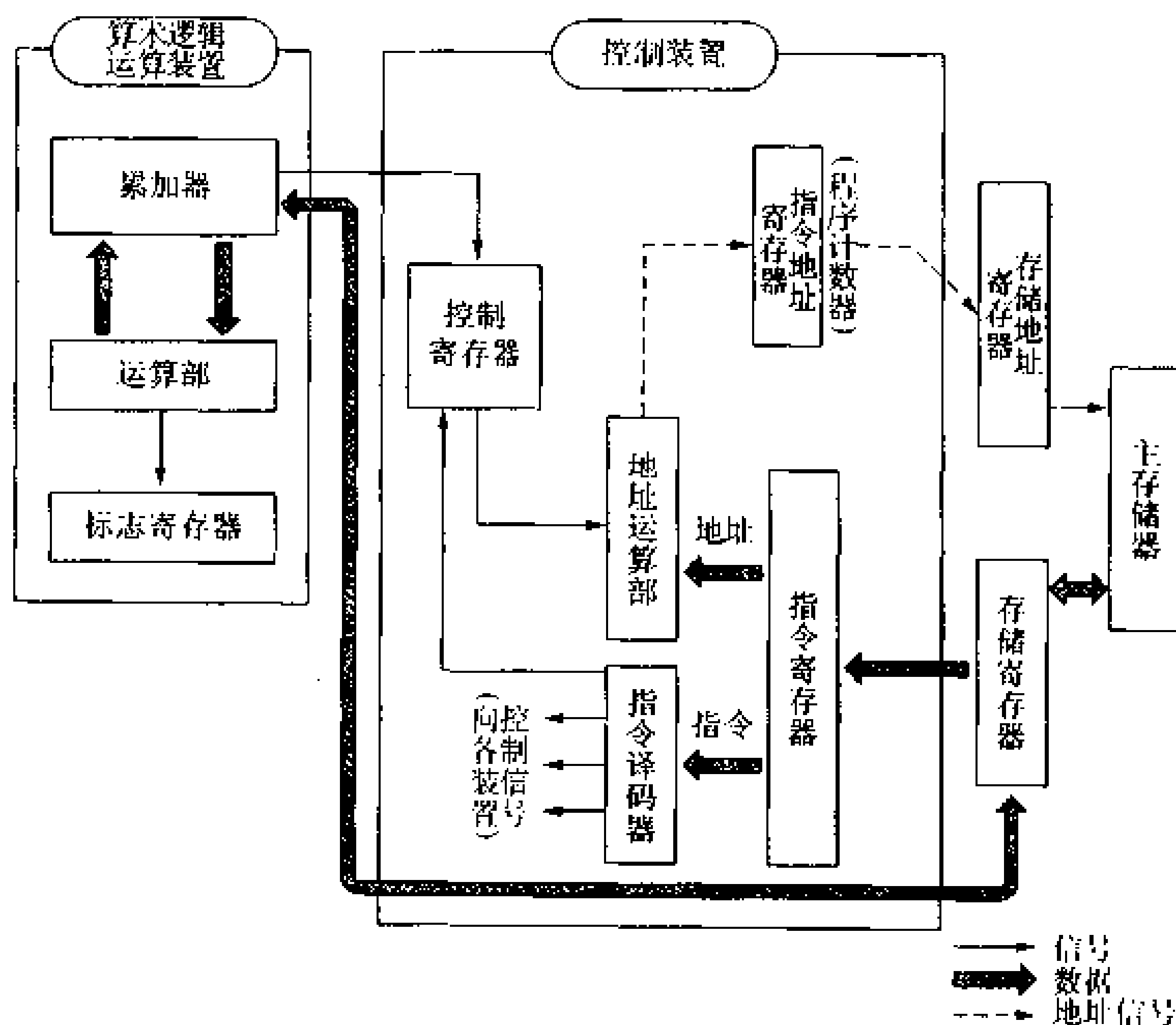


图 6.8 中央处理器的基本动作

### ● 指令读取步骤(instruction fetch cycle)

- ① 将程序存入主存储器里;
- ② 根据来自控制器的指令将存放程序的地址存入指令地址寄存器(程序计数器);

③ 将主存储器地址的内容经存储寄存器转送到指令寄存器里;

④ 将指令地址寄存器的内容移到下一个地址,并等待控制寄存器的指示。

### ● 指令执行步骤(execution cycle)

① 被转送到指令寄存器的内容,指令部分被送入译码器进行译码并产生相应的控制信号;

② 把称为运算对象的地址从指令寄存器的地址部分送到地址运算器;

③ 将地址运算器里指定的地址内容(数据)读入运算装置的累加器;

④ 将存储寄存器的数据和累加器的数据进行运算,其结果存入累加器中。然后再将这个信息传给控制装置;地址运算器;

⑤ 最后,处理完再回到②。

## □ 相关知识

### ● 根据计算机的使用形式进行分类

通用计算机

通用计算机:一般来说,是为了多种用途而制造的。它能用于各种业务。有大型、中型和小型等几种。

超级计算机

超级计算机:是以超高速运算为目的而制造的计算机,主要在大学和研究机构里使用。

办公用计算机

办公用计算机:是以比较小的企业等办公为目的而制造的计算机。

个人用计算机

个人用计算机:因为小型而廉价,所以作为普及型的个人计算机用。当然,企业也有很多使用这种计算机的。其使用形式有笔记本式和台式等多种机型。

掌上计算机

掌上计算机(hand held computer):是携带式的袖珍计算机,电源主要使用电池。

字处理器

字处理器(word processor):具有文件制作、编辑和保存等功能。日语字处理机备有假名文字向汉字转换的功能。

## 5 输入设备

### □ 要 点

从外部把程序和数据等信息读入计算机的装置就是输入设备。输入设备的主要部分涉及到键盘、鼠标、读卡机、光学字码阅读器、光标阅读器、磁墨水字符阅读装置以及声音输入设备等很多种类。

### □ 解 释

#### ● 手操作输入设备

键盘

**键盘**:是一个按照规定字符和数字、符号键等配置而排列成的设备。键的排列是由 JIS 确定的(图 6.9(a))。

鼠标

**鼠标(mouse)**:是一个形状似老鼠的附件,由金属球和开关组成。它是一边指示显示器上的位置一边进行输入的部件(图 6.9(b))。

光笔

**光笔(light pen)**:是一种像笔那样的输入部件。是用这种笔接触显示器画面进行输入的。用手操作银行的自动柜员机(取款机)时,手指触摸显示面板也是应用这一原理。

条形码

**条形码**:由种类不同的白和黑的平行线条组成,是用光照到条形码上时,进行光学读取的。

#### ● 卡片和纸带输入机

读卡机

**读卡机(card reader; CD)**:是把光照到打有孔的卡片上,并将其变成电信号进行程序和数据的读取。

读带机

**读带机(paper tape reader)**:是把光照到打有孔的纸带上,并将其转换成电信号进行程序和数据的读取。

#### ● 字符和符号输入装置

光学式字符阅读器

**光学式字符阅读器(OCR)**:是把光照到纸面所写的字符上,再由反射光来识别字符。有关字形的问题,JIS 有规定。现在由于图形识别技术的进步,手写的字符也能识读(图 6.9(c))。

图像扫描仪

**图像扫描仪(image scanner)**:是读取绘画和像片等画面的浓淡与颜色、数字化后进行输入的设备(图 6.9(d))。

光标阅读器

**光标阅读器(optical mark reader; OMR)**:是用铅笔在形式确定的卡片上加上符号,再让光照射后进行读取。

磁墨水字符阅读器

**磁墨水字符阅读器(MICR)**:是将用磁墨水印制的字符,用磁头进行读取,并进行字符识别。

#### ● 图形输入装置

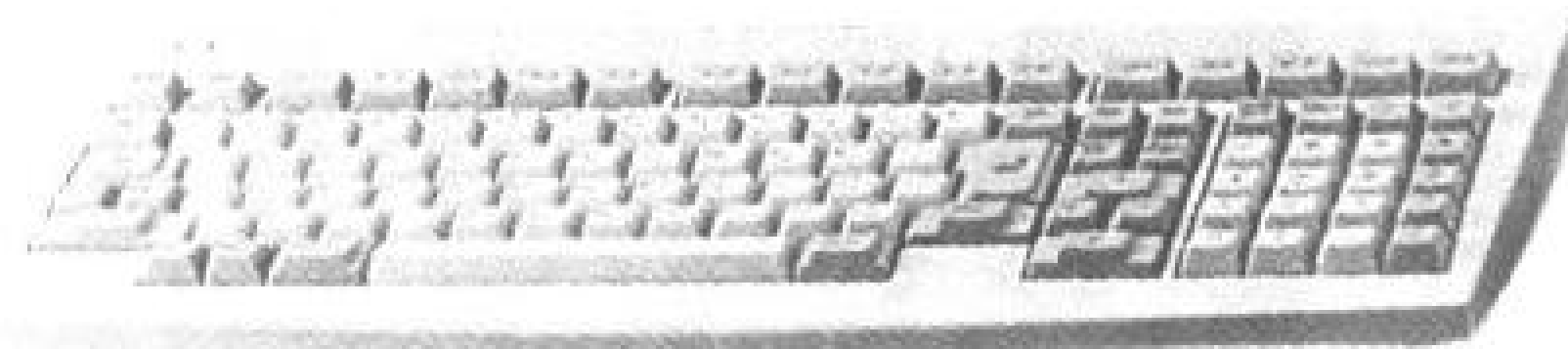
图形输入板

**图形输入板(tablet)**是图形输入装置的一种,也是小型的数字

转换器(digitizer)。能够输入手写的字符和图形以及符号等。

### ● 声音输入装置

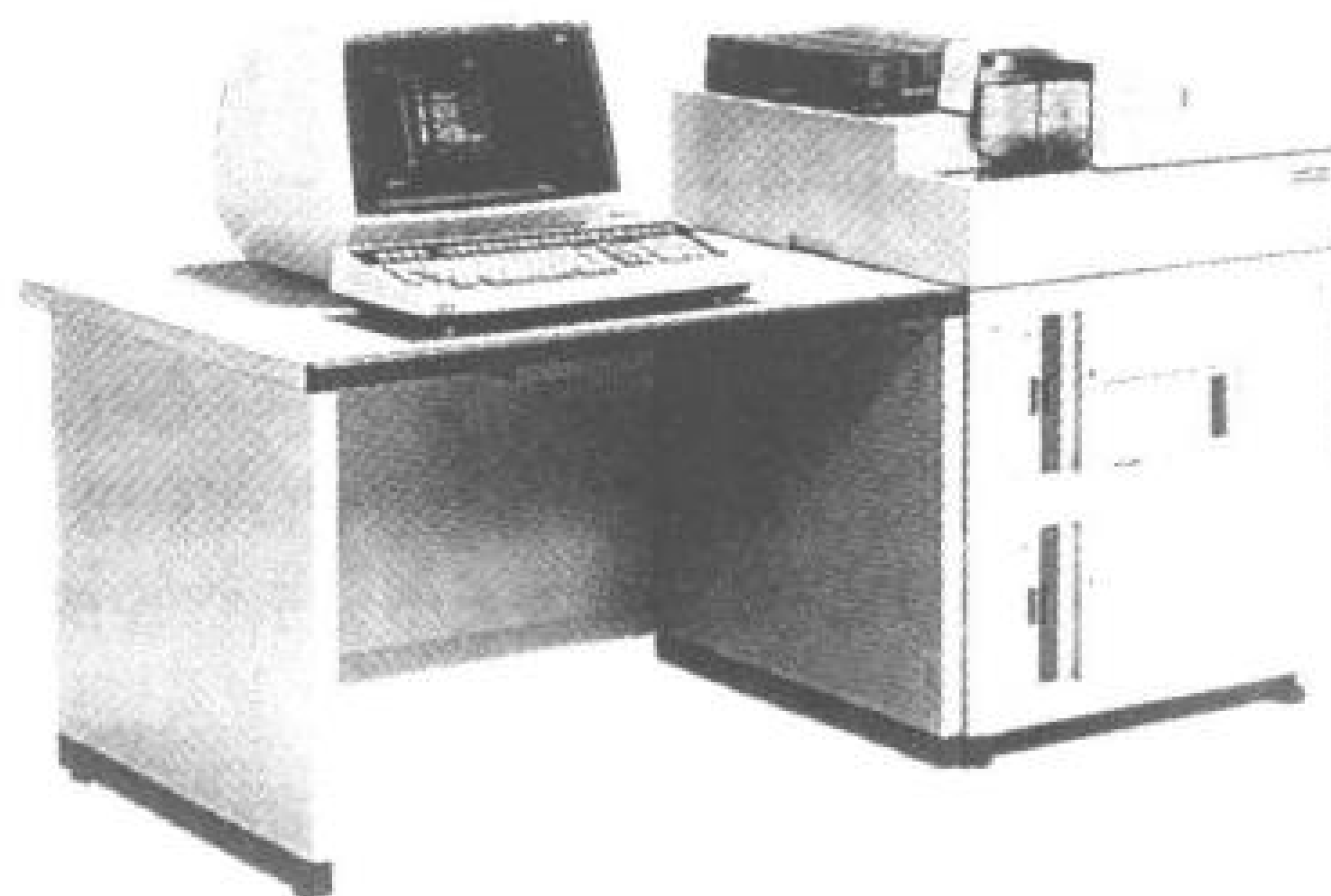
它是通过麦克风将声音变成电信号,再进行数据输入。目前能够识别的语言还有限。



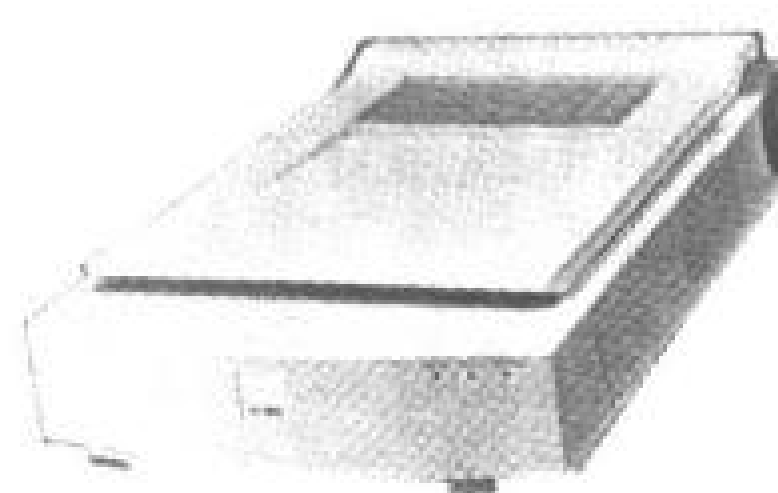
(a) 键 盘



(b) 鼠 标



(c) 光学式字符阅读器(OCR)



(d) 图像扫描仪

图 6.9 各种输入装置



## 6 输出设备

### □ 要点

输出装置有将字符和图形显示在画面上的显示设备和打印在纸面上显示的打印设备两种。显示设备和打印设备因为用打点绘制字符和图形,因而打点的密度越高越能表示出清晰的字符和图形。打印装置有利用机械冲击的冲击式打印机和利用光、热及墨水等非冲击式打印机两种。

### □ 解释

#### ● 显示设备

##### CRT 显示器

**CRT 显示器**(cathode-ray tube):是使用显像管的显示设备。显示字符的设备称作字符显示器,显示图形的称作图形显示器。显示是用控制电子束的亮度来控制显示亮度,再用电子束打点来描绘字符和图形。清晰度由扫线数决定(图 6.10(a))。

##### 液晶显示器

**液晶显示器**(LCD):液晶在正常状态下(不加电压时)能让光旋转  $90^\circ$ 。可是一加电压,就失去这一性质。利用这一现象,再用反射板与偏板相组合来显示字符。液晶显示在便携式计算机、台式计算机及电子表的显示上得到了广泛地应用(图 6.10(b))。

##### 等离子体显示器

**等离子体显示器**:是将氖气密封在两块玻璃板之间,在横竖配置的细线电极的交叉位置让氖气放电来显示字符和图形。因为没有闪烁,所以,眼睛很少出现疲劳。另外,随着彩色化技术的不断进步,可望全彩色大型显示部件的到来(图 6.10(c))。

#### ● 打印设备

##### 串行打印机

**串行打印机**(serial printer):有活字式和针式两种。不管哪一种方式都是借助墨带打印在打印纸上。个人计算机中多使用针式。

##### 行式(宽行)打印机

**行式(宽行)打印机**(line printer):能以行为单位进行打印,主要用于通用计算机。它有垂直行走的筒状式和水平行走的带状式两种。

##### 热式打印机

**热式打印机**:是利用电信号变换成元件发热的打印机。用构成字符和图形的打印点在纸上进行记录。它有用热压头直接打印的感热纸式和借助涂覆热熔性墨水的色带进行复制的热复制式两种。

##### 喷墨式打印机

**喷墨式打印机**:是将粒子化的墨水喷涂在纸上来打印字符和图形。由于高速低噪和易于彩色化,所以彩色打印机也正在普及。

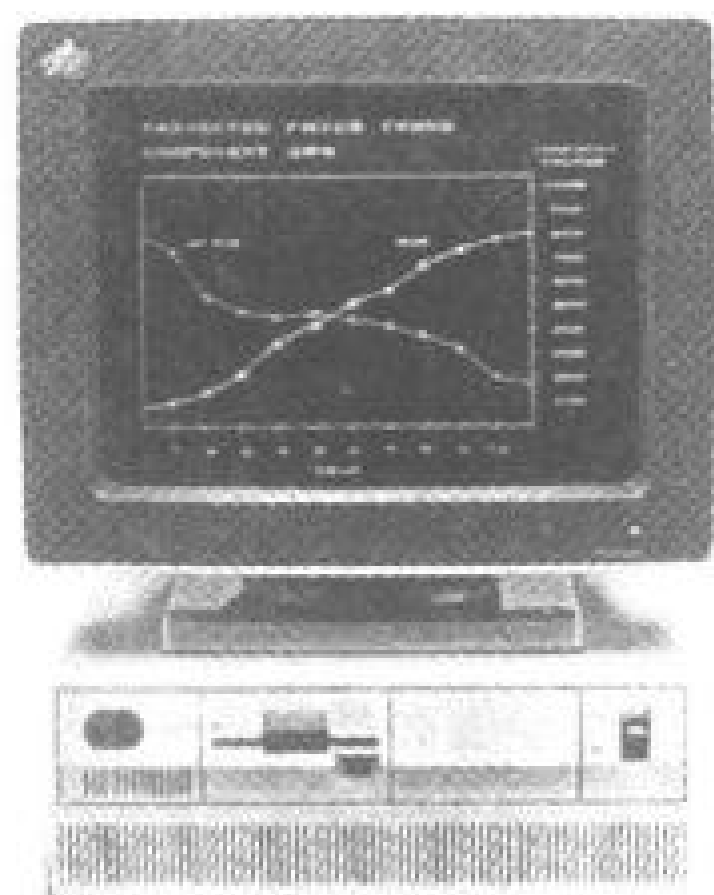
##### 激光打印机

**激光打印机**:是将控制的激光照射在感光滚筒上来形成字符

或图形的图像,并在静电发生的地方附着上调色涂料,再将其附牢在记录纸上(图 6.10(d))。

### X-Y 绘图仪

X-Y 绘图仪:它有滚筒式和平面导轨式两种。滚筒式是一边让装在滚筒上的纸移动,一边让笔左右移动来进行作图。平面导轨式是将纸固定在平面上不动,让笔在 X、Y 方向移动进行作图。笔的移动是用脉冲电动机驱动。



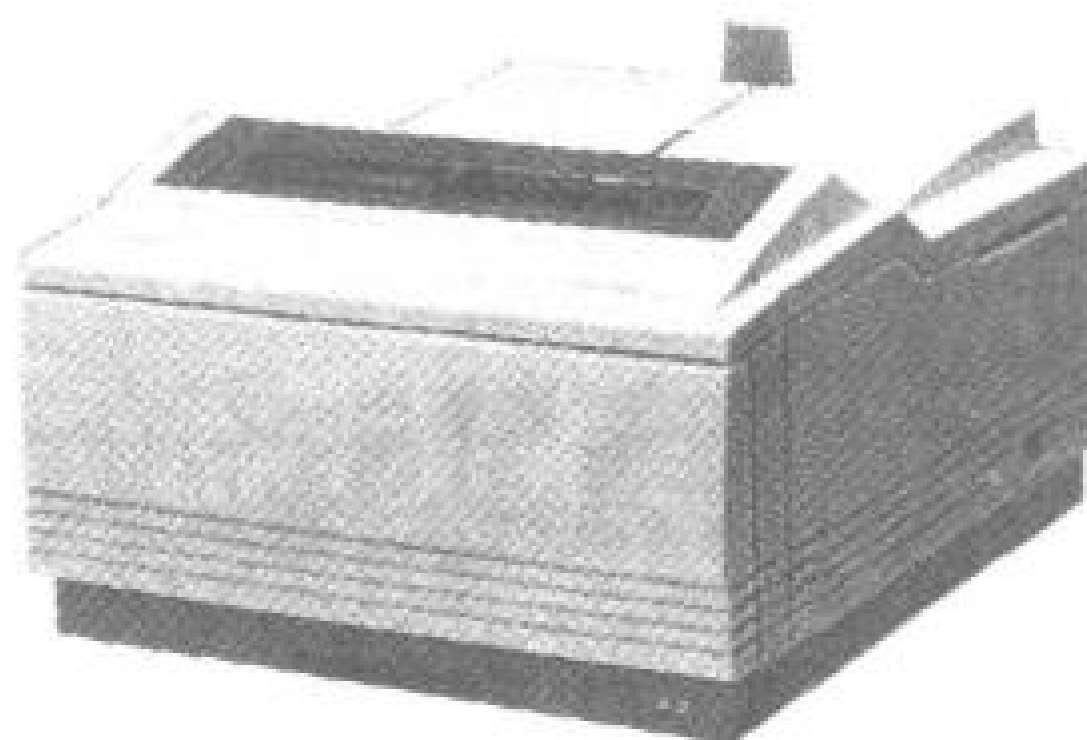
(a) CRT显示器



(b) 液晶显示器



(c) 等离子体显示器



(d) 激光打印机

图 6.10 各种输出装置

## 7 辅助(外部)存储部件

### □ 要点

因为主存储器是由中央处理器直接控制,所以读写速度快,但是存储容量小。补偿存储容量的是辅助存储部件。它读写速度慢,但是存储容量大。辅助存储部件有磁盘、软盘、磁带和光盘等。

### □ 解释

#### ● 磁盘存储器(magnetic disk storage)

是在圆形氧化铝基片表面上涂覆一层很薄的氧化铁等磁性材料,再通过磁头对其进行数据读写的设备(图 6.11)。一般是指通用计算机用的大型存储器。不过,个人计算机的硬盘也是这种磁盘的一种。

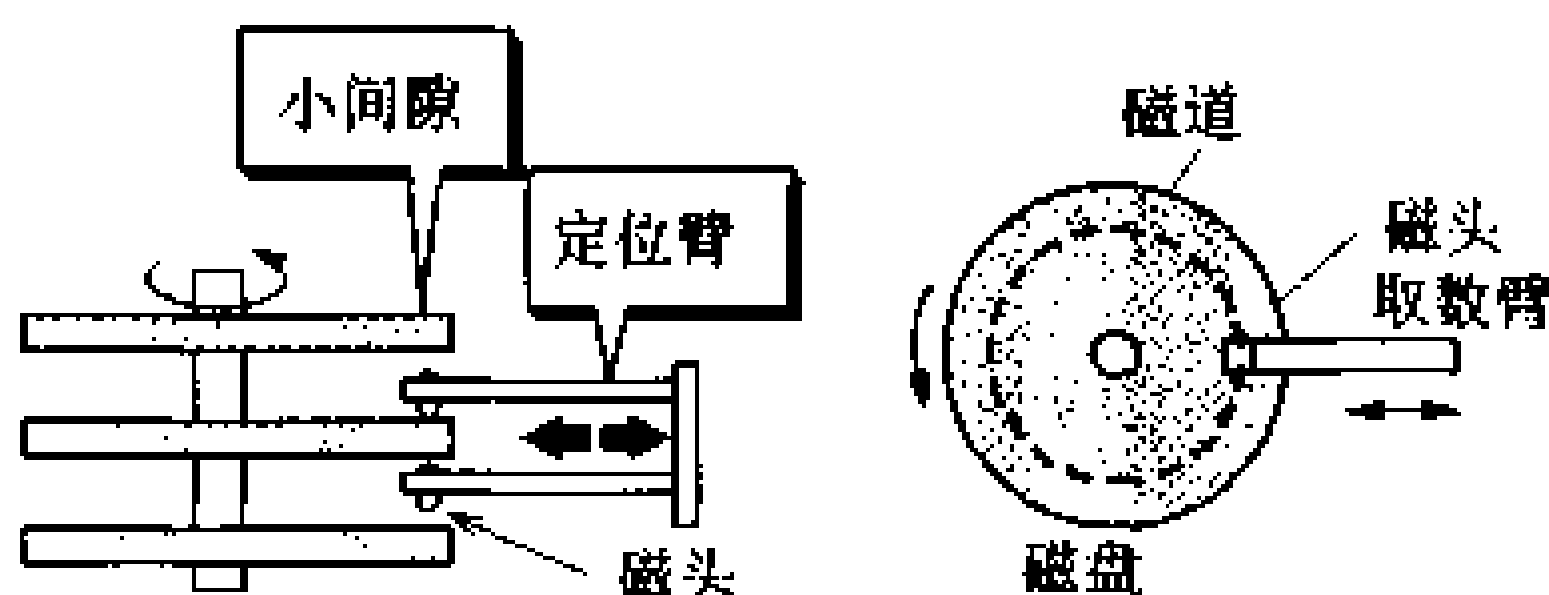


图 6.11 磁盘存储部件的构造

#### ● 软磁盘存储器(flexible disk storage)

将磁性材料涂覆在软塑料两面上,然后将其封入方形塑料夹内(图 6.12),一般称它为软盘(软塑料磁盘),这也是它的商品名。8 英寸见方是它的标准尺寸。不过,一般是 5 英寸(5.25 英寸)和 3.5 英寸的。双面双密的存储容量为 1MB(兆字节)。

#### ● 磁带记忆设备(magnetic tape storage)

是可将数据记录在匀速移动的磁带表面上,又可将记录的数据读出的设备。它价格便宜容量也大,不过,它的缺点是只能依照记录的顺序来依次读取。

#### ● 光磁盘设备(magnet-optical disk; MO)

塑料底板表面上涂覆上强磁性材料,然后一边加磁场一边进行激光照射,再利用磁化方向的反转来进行读写的设备。存储容量很大并能以 500MB~1GB 的高密度进行记录。

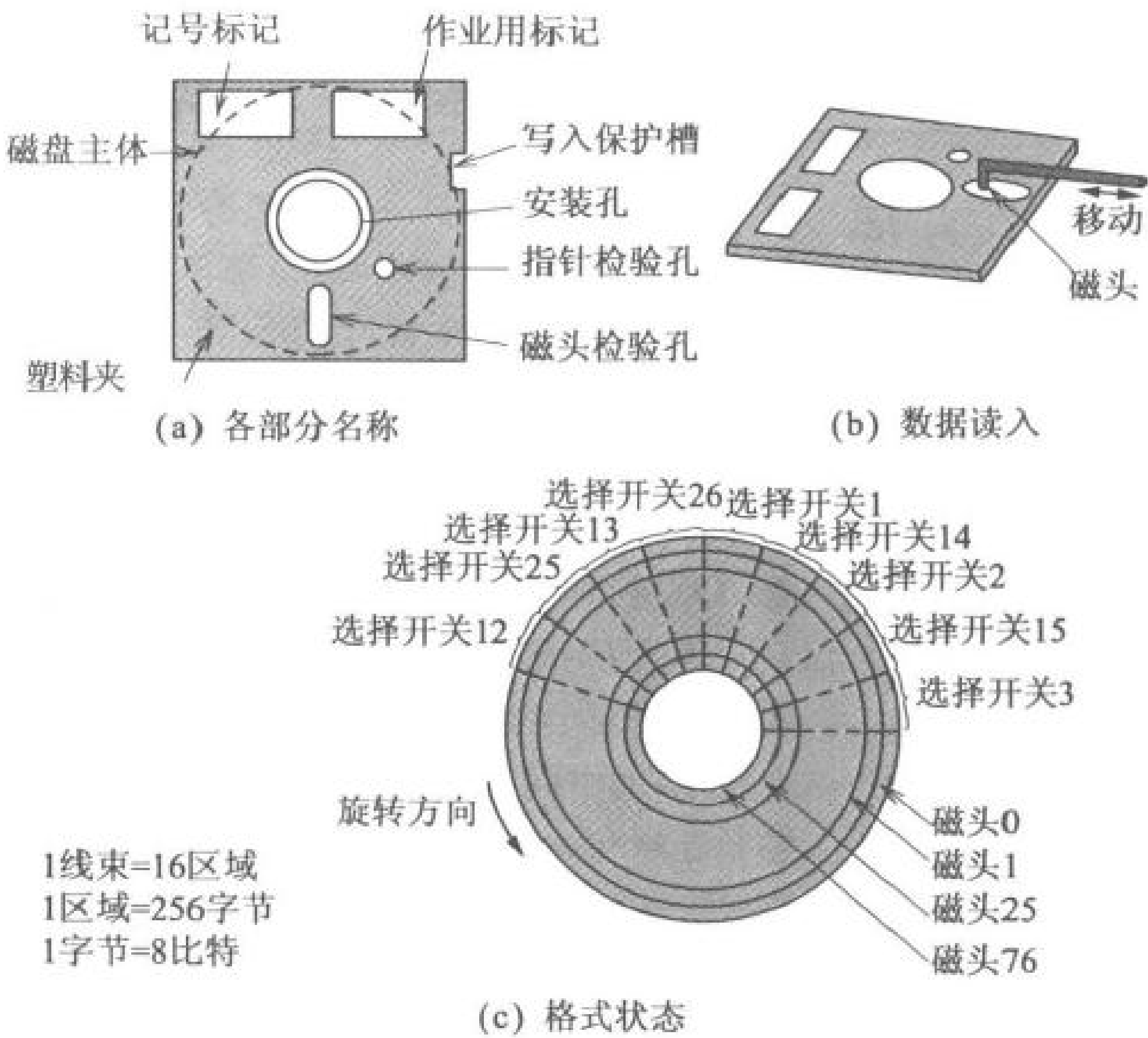


图 6.12 软盘的构造

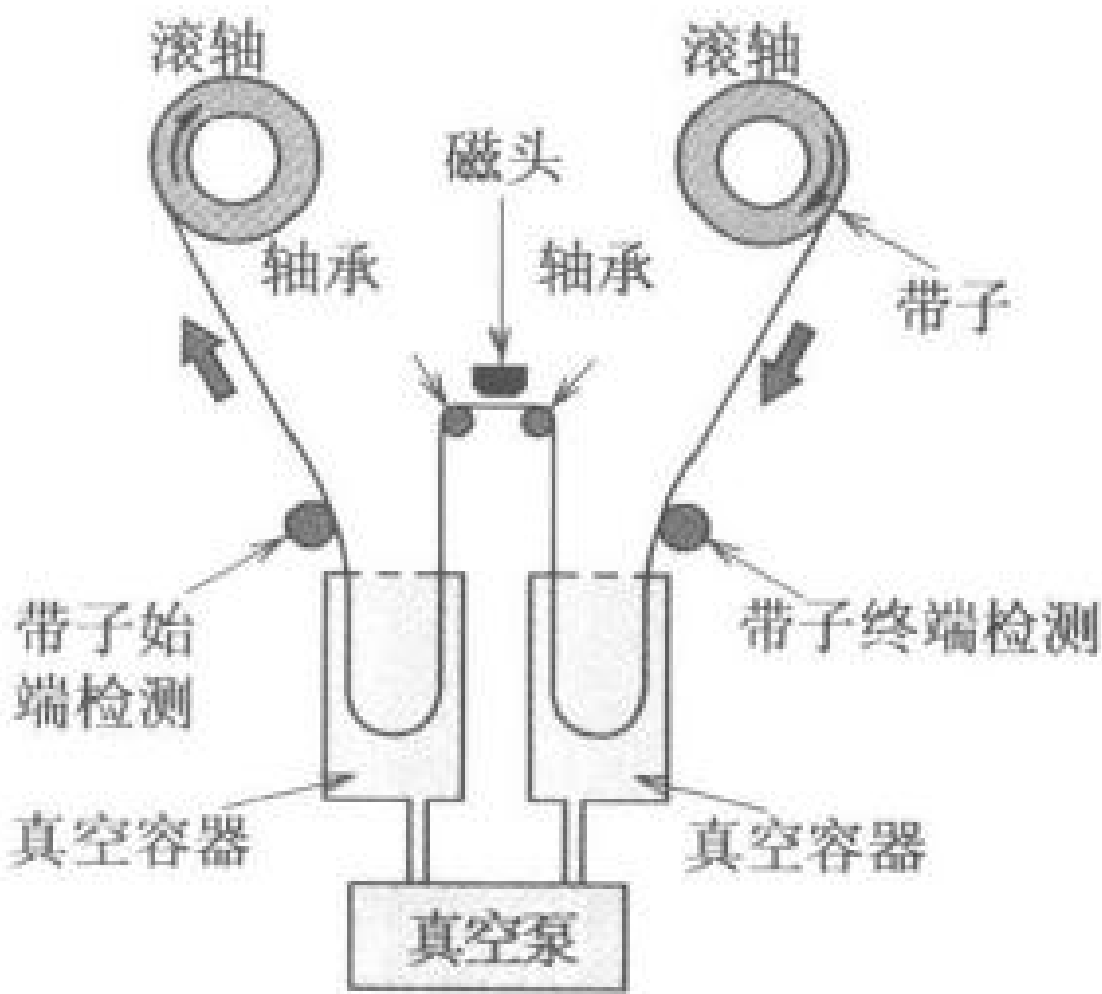


图 6.13 磁带存储装置的构造

□ 相关知识 ● 硬磁盘

是个人计算机最常使用的磁盘。是磁盘小型化的产品。基本原理与其它磁盘完全相同。它与软磁盘相比,存储容量大几十到几百兆字节,存取的速度也快得多。

## 8 操作系统

### □ 要点

将计算机和具有各种功能的外部设备相结合,就构成了系统。为了让这些系统高效率运用,硬件固然很重要,可是软件负担的工作也很多。软件的核心是操作系统(OS)。OS有CP/M、MS-DOS、UNIX、OS/2以及Windows等。有了操作系统,指令输入操作也就变成用鼠标来选择图形字符的简单方法了。

### □ 解释 ● OS的作用和构成

所谓OS就是为了有效地使用计算机系统的基本软件。可以认为像图6.14所示那样,它是介于硬件和应用软件(也含语言处理程序)的中间程序。构成OS功能的程序如图6.15所示,它由控制程序和处理程序组成。因为控制程序能提供输入输出控制、数据管理等多种服务,所以,人们并不在意硬件而更多地关心能够简单地操作计算机。

控制程序  
处理程序

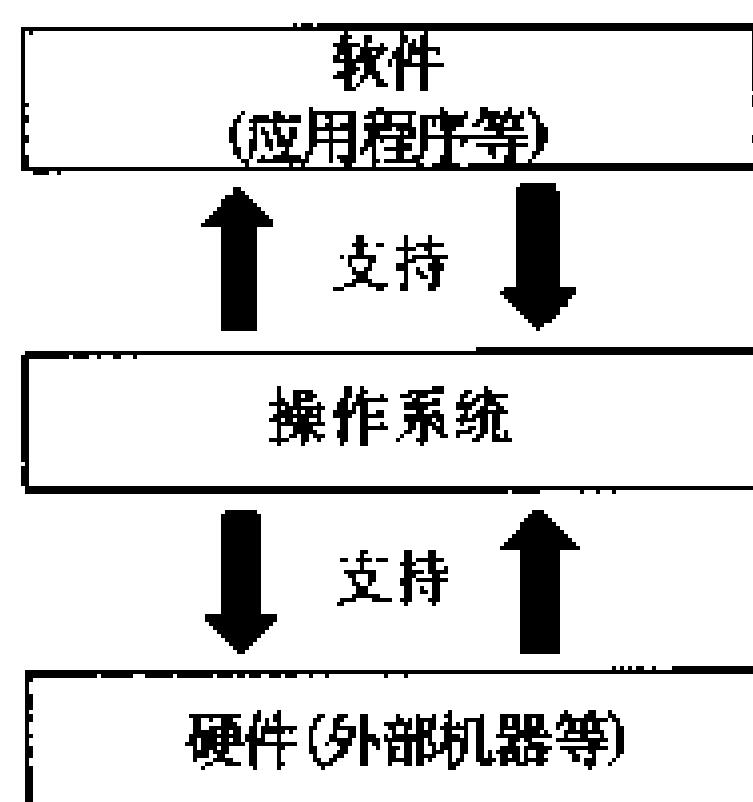


图 6.14 OS 的作用

处理程序是在控制程序管理下进行工作的程序,也是支持用户进行工作的程序。在OS提供的处理方式上有如下一些处理。

批处理

#### ① 批处理(batch processing)

也叫成批处理方式。因为是将数据积攒到一定量或一定时间后,做一次统一处理的处理方式,所以处理效率高。

实时处理

#### ② 实时处理(real time processing)

亦称即时处理。它是一有处理要求就答应立即进行处理的方式,适用于零碎的处理。

分时处理

#### ③ 分时处理(time sharing processing)

它是几个使用者共同使用一台计算机时的处理方式。是将来自各终端的工作划分成微小时间段来进行处理的方式。

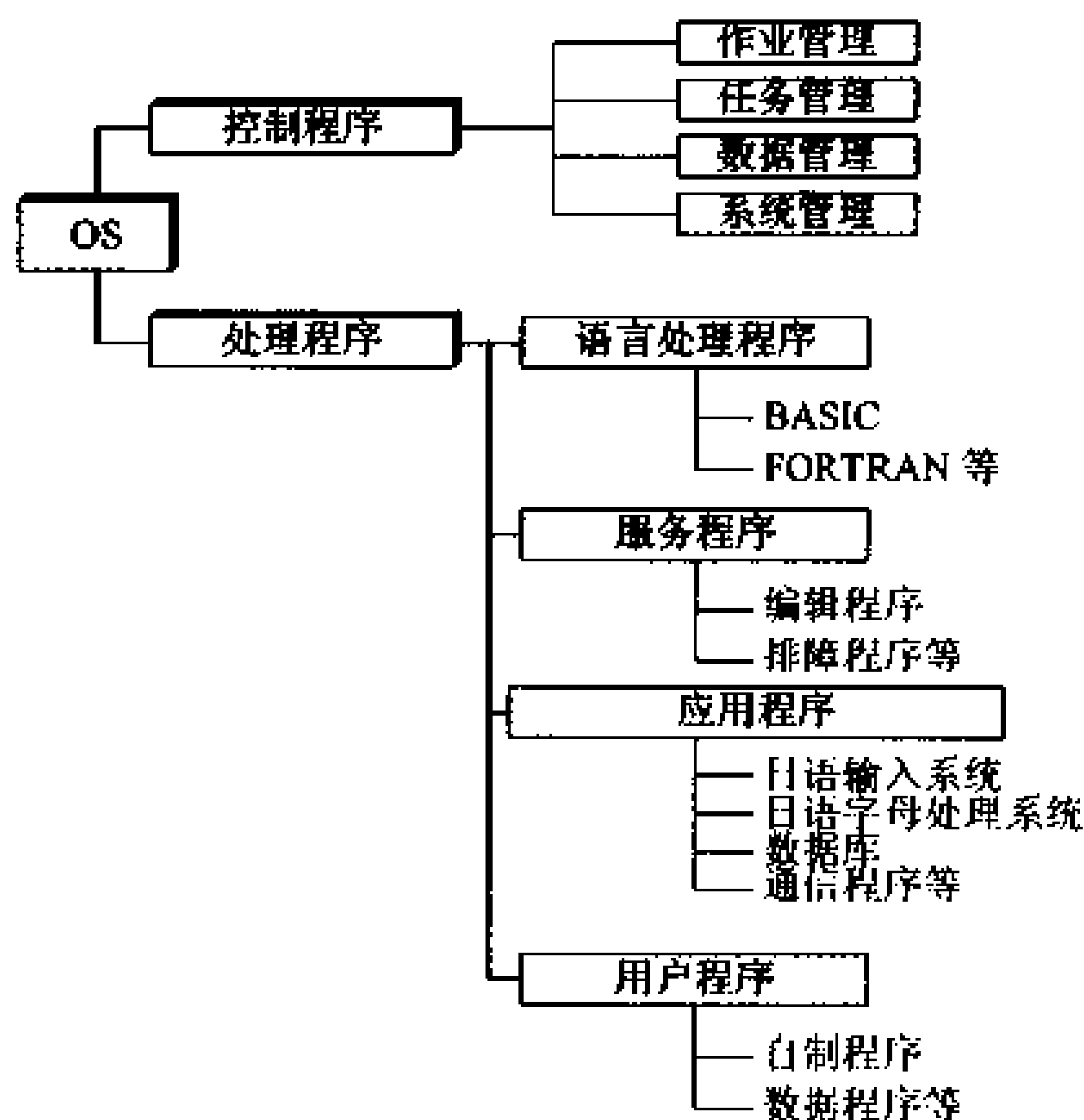


图 6.15 OS 的构成

## □ 相关知识 ● Windows 95

Windows 95 与 DOS 完全不同,可以说,给个人计算机带来划时代变革的 32 比特 OS。OS 一变成 32 比特,个人计算机利用环境也就改变了,应用软件也需要做与此相应的改变。其特征是多重功能的强化、网络功能、多媒体功能,以及通讯功能的标准配备和即插即用(plug and play)功能等。所谓即插即用功能,就是在连接外部设备和扩充连接接口时,在计算机识别连接的设备后,能自动装入对应的设备驱动程序。因此有用户不进行较烦的设定也能解决问题的优点。操作方面,可以一边看着图像(表示功能的绘画字符)一边用鼠标直观地进行输入,所以就是初学者也极容易操作。另外,优于日语表达能力,画面处理速度快清晰度高。

## 9 程序语言和语言处理程序

### □ 要 点

程序的设计与制作叫作编程。编程过程中写出的、计算机能认识的语言叫作程序语言。语言里有计算机容易理解的低级语言和人们容易理解的高级语言。语言分类如图 6.16 所示。

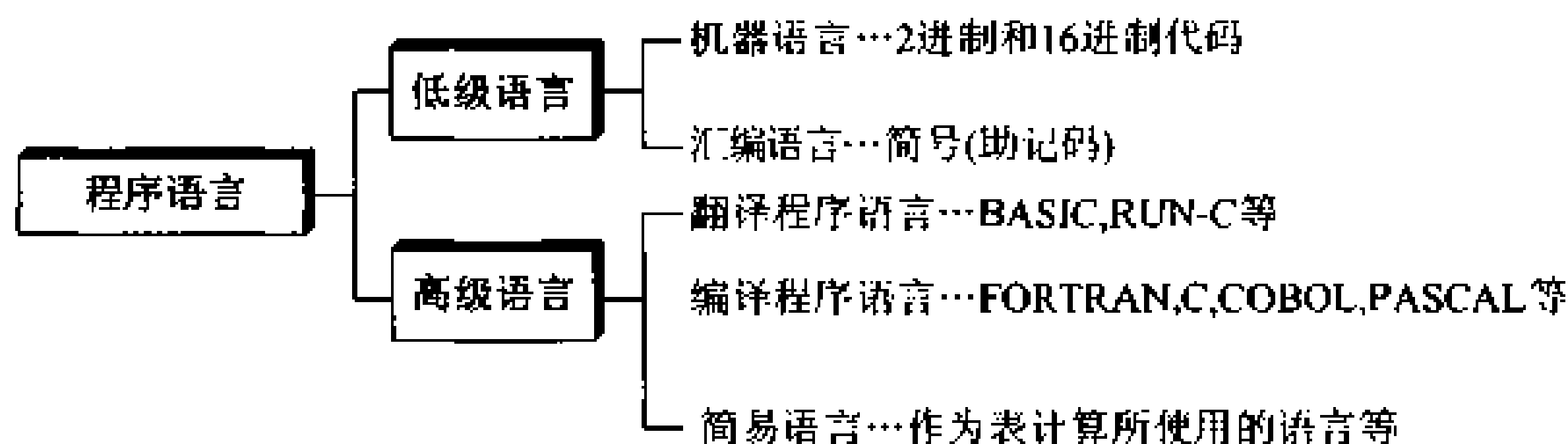


图 6.16 程序语言的分类

用程序语言写出的原始程序(如用 FORTRAN、C、BASIC 等写出的程序)经过图 6.17 那样的处理后再由计算机执行。

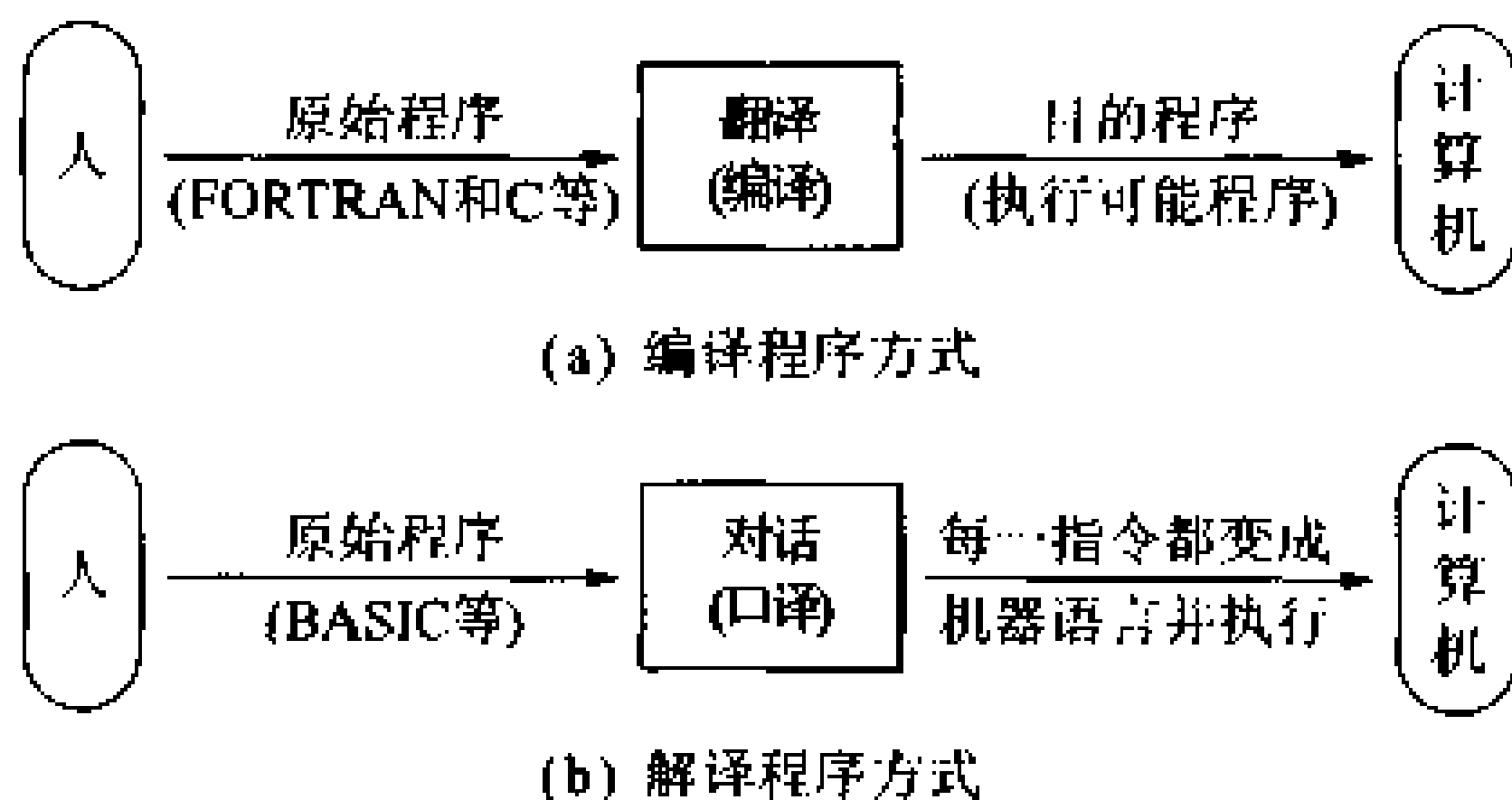


图 6.17 语言处理方式

### □ 解 释 ● 翻译与对话

#### 翻译

所谓翻译就是把用某种程序语言所写的程序,不改变其意义,而将其变形成其它程序语言或者机器语言的工作。也就是将 FORTRAN 和 C、COBOL 等编程语言转换成可执行的目的程序(即翻译成计算机能够直接执行的机器语言程序)。

#### 对话

另一方面,所谓对话就是在使用者和计算机之间,像相互对话似地进行数据交换和程序的立即修正等。BASIC 是可以进行这

种对话的一种语言。它常常因为一边反复进行对话,一边进行处理,所以与编译程序语言相比,处理速度慢。

● 程序语言

低级语言

① 低级语言

它是由不用翻译,计算机能直接认识,并能立即执行的机器代码构成。没有互换性,因而不能在不同的机器上使用。

机器语言

机器语言是由指令代码和操作数组成,并用 0 和 1 这种 2 进制代码编成。

汇编语言

② 汇编语言(assembly language)

它因为机器语言难懂,为了把它多少弄得容易懂些,所以是用英语单词的缩写(助记符)写出来的。

高级语言

③ 高级语言

它是使用人们能够理解的惯用表达方式来写出算术式和处理内容。FORTRAN、C、BASIC 等语言能原封不动地使用数学的表示法。另外,COBOL 几乎能用英语表示。

● 语言处理程序

汇编程序

汇编程序:是将用汇编语言写的原程序翻译成机器语言的目标程序的语言处理程序。

编译程序

编译程序(compiler):是将原程序翻译成机器语言或是与机器语言相对应的仿真代码的翻译程序。翻译过程如下:

- ① 将原程序的指令变换成相同意义的机器语言指令;
- ② 将指令所必需的库程序与目标程序相结合;
- ③ 将构成程序的各部分进行恰当的结合,制成目标程序。

在编译程序情况下,通常从一个原程序的指令生成几个机器语言。可是在汇编程序情况下,是一一对应的。

解释翻译程序

解释翻译程序:是将原程序的指令一边逐条解释,一边执行的语言处理程序。其代表性的程序就是前面介绍的 BASIC。

生成程序

生成程序(generator):如果用参数形式给出输出输入和处理的条件,这就是在处理上自动生成所需要程序的程序。最近,各个厂家提供了各种各样的生成程序。

图 6.18 给出了迄今为止各种语言程序例。每种都是求 1~10 的累加的程序。



(a) COBOL

\* 到 10 的合计

```
IDENTIFICATION      DIVISION.
PROGRAM-ID.          到 10 的合计.
AUTHOR.              才一么社
DATE-WRITTEN.        96/03/31.
DATE-COMPILED.       96/03/31.
*
ENVIRONMENT          DIVISION.
CONFIGURATION        SECTION.
SOURCE-COMPUTER.     FM/V.
OBJECT-COMPUTER.     FM/V.
SPECIAL-NAMES.       CONSOLE IS CRT.
```

\*

```
DATA                DIVISION.
WORKING-STORAGE     SECTION.
77  总和            PIC 99.
77  数              PIC 99.
01  目录(标题) PIC N(10) VALUE 到 10 的
合计
```

\*

```
PROCEDURE           DIVISION.
开始.
```

```
    DISPLAY SPACES.
    DISPLAY 目录(标题) AT 1010.
    MOVE SPACE 10 总和 数
    PERFORM 处理 10 TIMES.
```

\*

```
    DISPLAY 到 10 的合计 AT 1010.
    DISPLAY 总和 AT 1035.
    STOP RUN.
```

处理

```
    ADD 1 TO 数
    ADD 数 TO 总和
    EXIT.
```

(b) C

```
#include <stdio.h>
void main<void>
{
    int i, n, s;
    for(s = 0, n = 0, i = 1; i <= 10; i
    + 1){
        n + 1;
        s + = n;
    }
    printf("到 10 的合计 = %d\n", s)
}
```

(c) FORTRAN

```
I = 0
DO 10 N = 1, 10
I = I + N
10 CONTINUE
WRITE(6, 20) I
20 FORMAT(1H1, I2)
STOP
END
```

(d) BASIC

```
100 I = 0
110 FOR N = 1 TO 10
120 I = I + N
130 NEXT N
140 PRINT "合计 = "; I
150 END
```

图 6.18 各种语言程序

## □ 相关知识 ● 语言变换程序

### 翻译器

翻译器(translator):将某种机型工作的程序变换成其它机型可工作的程序,即为翻译程序。

### 仿真器

仿真器(simulator):是应用仿真的思维方法编制的程序,一边解析某种机型计算机的程序,一边将其改写成适合于其它机型的指令并予以执行的程序。

### 模拟器

模拟器(emulator):是将仿真器的某一部分进行微程序化,以执行相同程序,得到相同结果的方法来模仿其它系统的程序或者装置。

# 10 流程图与程序

## □ 要 点

流程图是为了表示算法、依照一定的规则将处理步骤图形化而画成的图。画流程图的好处在于：

- ① 能够正确把握处理内容以及程序的处理步骤；
- ② 易于发现错误并修改；
- ③ 能够正确向他人说明处理内容，且易于改进程序。

流程图有编程序时用的程序流程图以及系统设计时用的系统流程图。

## □ 解 释

### ● 流程图的考虑方法

绘制流程图时要依照确定的格式，绘出的图要大家都能看懂。其绘制步骤如下：

- ① 充分理解问题的本质，对给出的所有条件进行分析；
- ② 按照处理顺序，将要处理的内容逐条写出并整理；
- ③ 对①、②部分的不足以及含糊不清的地方予以补充；
- ④ 绘制流程概图；
- ⑤ 检查处理顺序，绘制可用于程序编制的流程详图。

以按上述步骤绘制的流程图为根据，用程序语言将其写出来。

这一工作称为编程。

### ● 流程图使用的符号

流程图使用的符号如下：

#### ① 始末端符号、连线与箭头

始末端符号标在流程图的开始与结束处。连线用于连接各处理符号。一般的处理顺序是沿连线从左向右、从上到下，不遵从此顺序时可使用箭头明确标示出其处理方向（参见图 6.19(a)）。

#### ② 处理符号

算法及各种处理内容写于方框内。此称为功能描述。功能描述的写法无硬性规定，但希望写得通俗易懂（参见图 6.19(b)）。

#### ③ 判断符号

变更处理顺序或处理内容时使用。在菱形的中间写上应该判断的内容，出口处写上分枝条件。有多个出口时，要逐一书写分枝条件（参见图 6.19(c)、(d)）。

#### ④ 输入输出符号

表示输入、输出的符号是平行四边形。输入输出的内容写于

编程

始末端符号

连线 箭头

处理符号

判断符号

输入输出符号

其中(参见图 6.19(c))。

#### 循环始末端符号

##### ⑤ 循环始末端符号

由循环的始端和终端组成,用于反复循环处理。符号的中间书写循环名、循环结束条件等(参见图 6.19(f))。

#### 其它符号

##### ⑥ 其它符号

常用的有准备符号、程序接头符号、预定义处理符号以及注释符号等(参见图 6.19(g))。

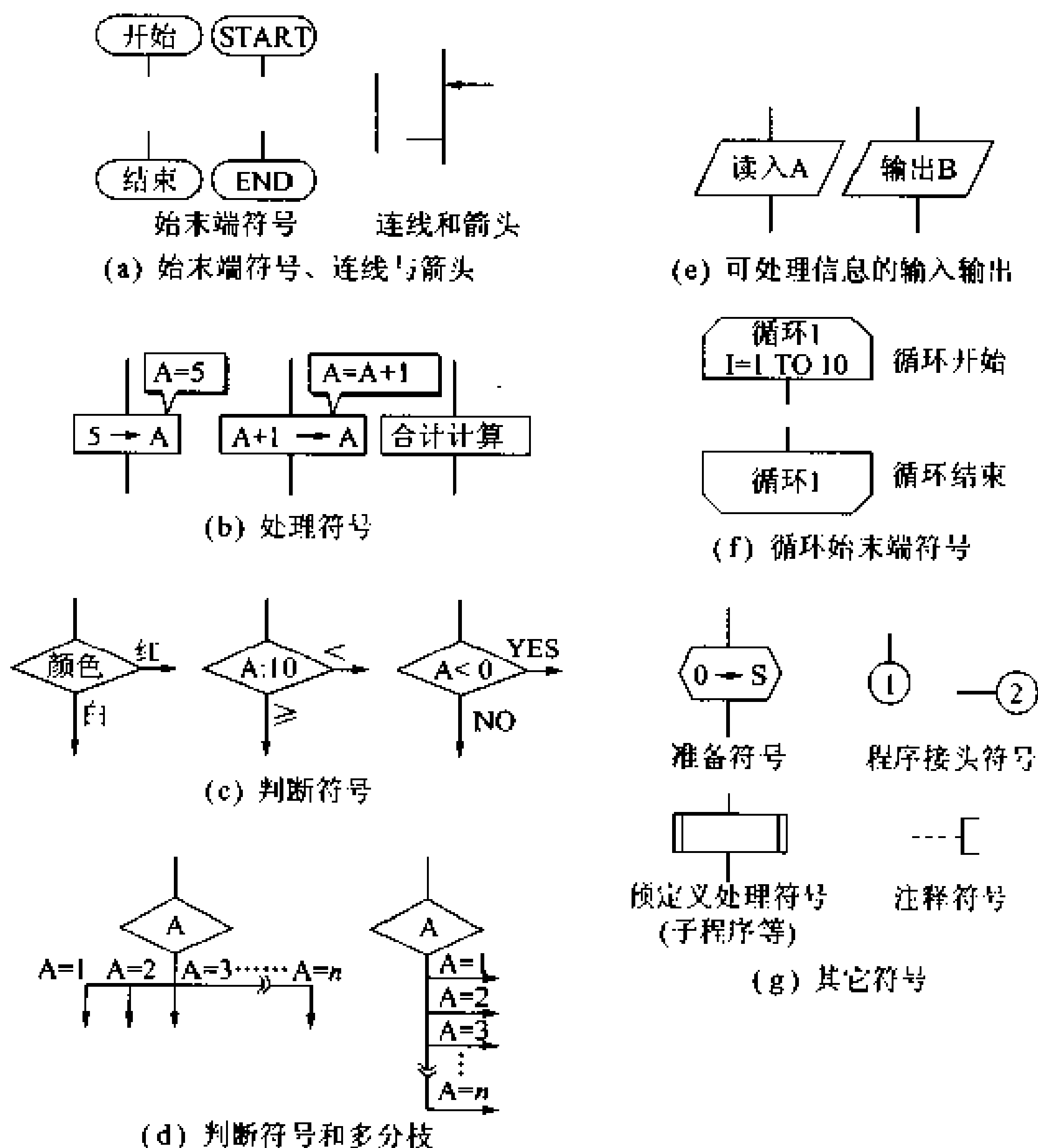


图 6.19 流程图使用的符号

JIS 将流程图分为程序流程图和系统流程图。个人计算机中,输入仅限于键盘,输出仅限于显示器或打印机。这时,尽管是程序流程图,实际上也常使用系统流程图的符号。系统流程图的输入输出符号示于图 6.20 中。

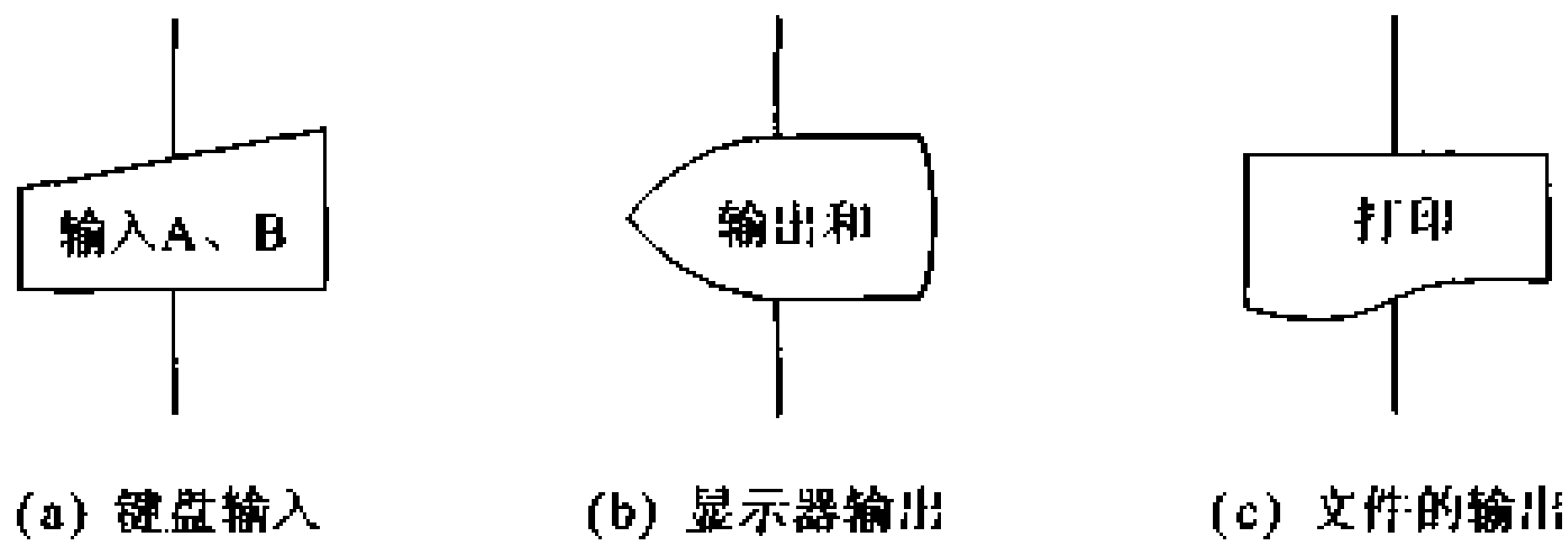


图 6.20 系统流程图的输入输出符号

● 流程图的基本类型

流程图的基本类型,分为一直连续处理下去的连续处理、按照条件分成几个处理的选择或分枝处理、一边反复一边处理的反复处理等三类。基本类型示于图 6.21,这里采用的是系统流程图。

连续处理

① 连续处理

图 6.21(a)表示的是,从键盘输入 A、B 两个数,其四则运算的结果显示在显示器上。这样的处理,其流程图可用直线型表示。

选择处理

② 选择处理

图 6.21(b)表示的是,从键盘输入一整型数 A,其数为正时求其平方根,其数为负时求其平方,结果显示在显示器上。即按照所给条件的真伪变更处理路线。

反复处理

③ 反复处理

图 6.21(c)、(d)表示的是,只有所给条件为真时才反复处理,为假时变更处理路线。此又有处理前判断的前判断和处理后判断的后判断。前判断和后判断中,分枝条件是不同的。

□ 相关知识

● 模块化编程

程序中使用 GOTO 语句(无条件转移语句)过多时,处理的流程会变得复杂。为此,往往采用连续、选择、反复处理等基本模块而不使用 GOTO 语句,以使程序易懂。特别对大型程序,则是将其处理功能按层次分解,甚至分解到一个一个的功能单元。这种编程技术即为模块化编程。

● 程序例

以求解二次方程式为例,图 6.22 给出了其流程图与程序的关系。

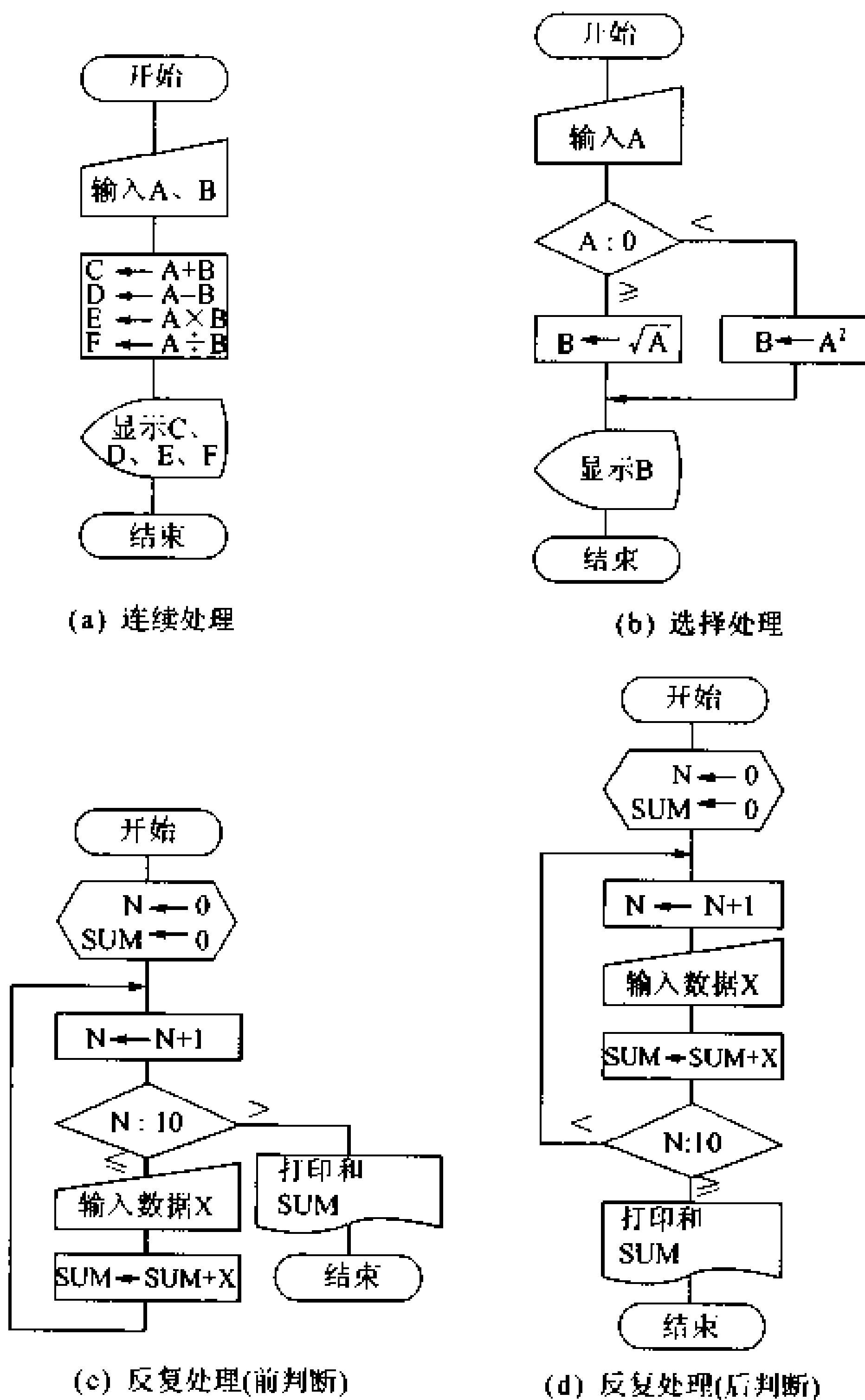
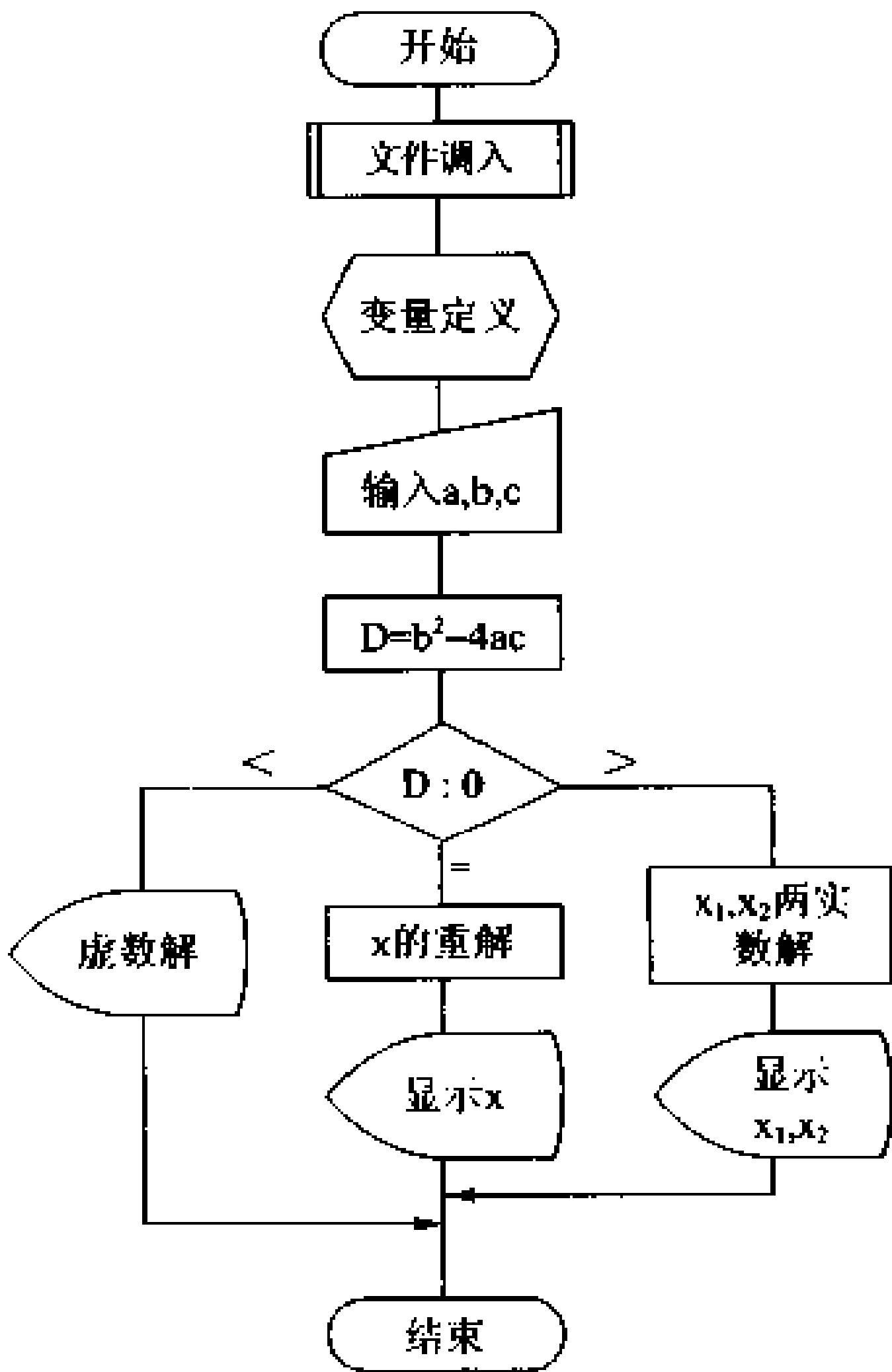


图 6.21 流程图的基本类型



```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
void main(void)
{
    int a, b, c, d;
    float x, x1, x2;
    printf("输入整数 a, b, c");
    scanf("%d %d %d", &a, &b, &c);
    d=b*b-4*a*c
    if(d>0){
        x1=(-b+sqrt(d))/(2*a);
        x2=(-b-sqrt(d))/(2*a);
        printf("x1=%4.2f x2=%4.2f\n", x1, x2);
    }
    else if (d==0){
        x=-b/(2*a);
        printf("x1=x2=%4.2f\n", x);
    }
    else printf("虚数解");
}
```

图 6.22 流程图与程序

## 11 数据处理

### □ 要 点

处理数据时,要分清其数据是常数或是变量,是字符或是数值,如果是数值,是整数或是实数。数据不同,处理的方法不同。而且用硬件处理和用软件处理也不同。本节就有关软件的数据处理进行说明。

需要注意的是,软件使用的程序语言不同,数据的处理是相当不同的。

### □ 解 释 ● 常 数

所谓常数是指其值为自身值的数据。如图 6.23 所示,它分为字符数据和数值数据两大类。

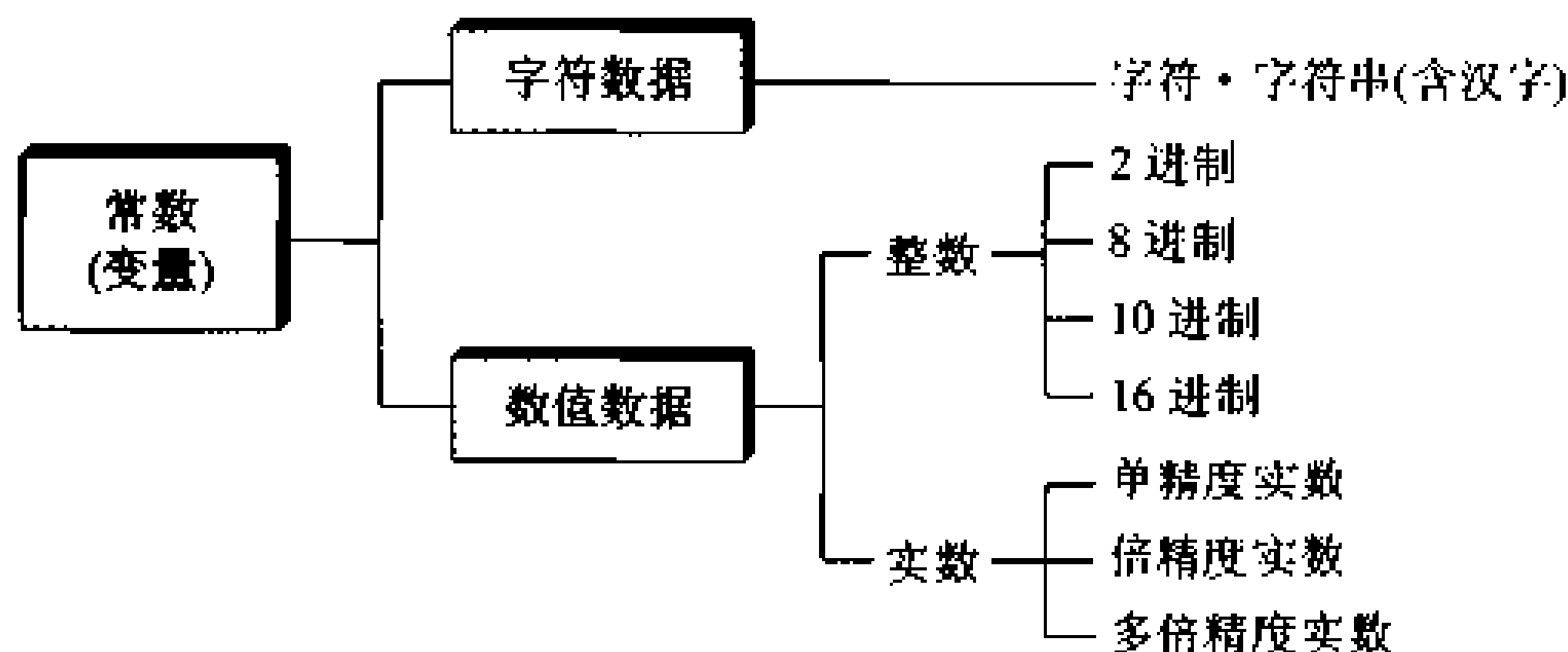


图 6.23 常数的分类

这些数据,在计算机内部是用 2 进制数表示的。表示 2 进制数的 1 位的最小单位是比特,通常 8 比特作为一个字节来处理,用 1 个字节来表示一个数字、字母、假名文字。

#### 字符数据

##### ① 字符数据

字符,根据所使用的程序语言分为字符和字符串。例如,BASIC 语言中字符和字符串的处理完全相同,而在 C 语言中,则有‘A’为字符、“A”为字符串的区别。

#### 数值数据

##### ② 数值数据

整数指的是 10 进制形式的  $-32768 \sim +32767$  范围内的数值。所谓实数的精度,是表示数量能够识别到什么程度的一个“字”。究竟一个“字”是多少比特,计算机不同所定的规格也不同。单精度是以 1 个字为基本格式,双精度是两个字,两个字以上则称

为多倍精度。

### ● 变 量

计算机中存储数据的地方很多,究竟什么地方存着什么数据?要明白这个就得依靠地址。给地址起的名字(记号)就叫做变量(变量名)。高级语言中,无须一一指明地址,只要指明变量名即可自由地读写数据。变量可以自由起名,但是不能使用语法预先规定的专用词。变量名的识别字符数,因程序语言而异。

## □ 相关知识 ● 汉字的表示

计算机处理日本语言文字时,对于汉字是进行编码处理的。汉字(含平假名)用1个字节表示不够,因而使用2个字节。也因而将汉字称为2字节字符或全角字符,1字节的字符则称为半角字符。JIS第一批确定的汉字为2965个,第二批确定的为3390个,JIS还另外确定了英文字、数字、平假名、希腊字、俄文字等492个。

对于汉字的变换,使用有JIS汉字编码及转换JIS汉字编码。现在几乎全用转换JIS汉字编码。转换JIS汉字编码是由JIS汉字编码转换来的,是将高字节分配给JIS 8位编码(参见表6.1)的未定义部分。BASIC中之所以不会发生图形符号字母与汉字的混乱,原因即在于此。

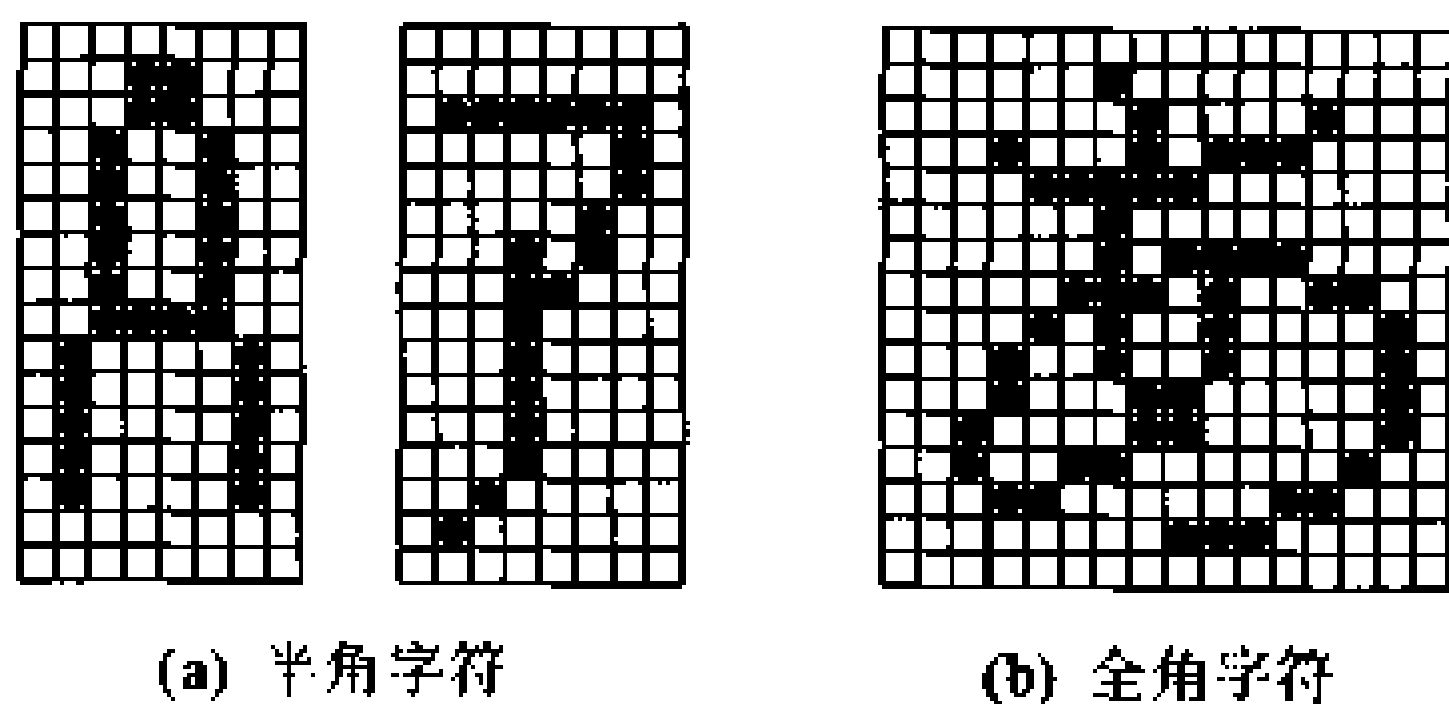


图 6.24 半角字符和全角字符



# 12 文 件

## □ 要 点

文件指的就是按不同项目整理成的记录集。计算机要高速处理大量的数据,因而都是将按记录单位收集在一起的内容当作文件进行处理。

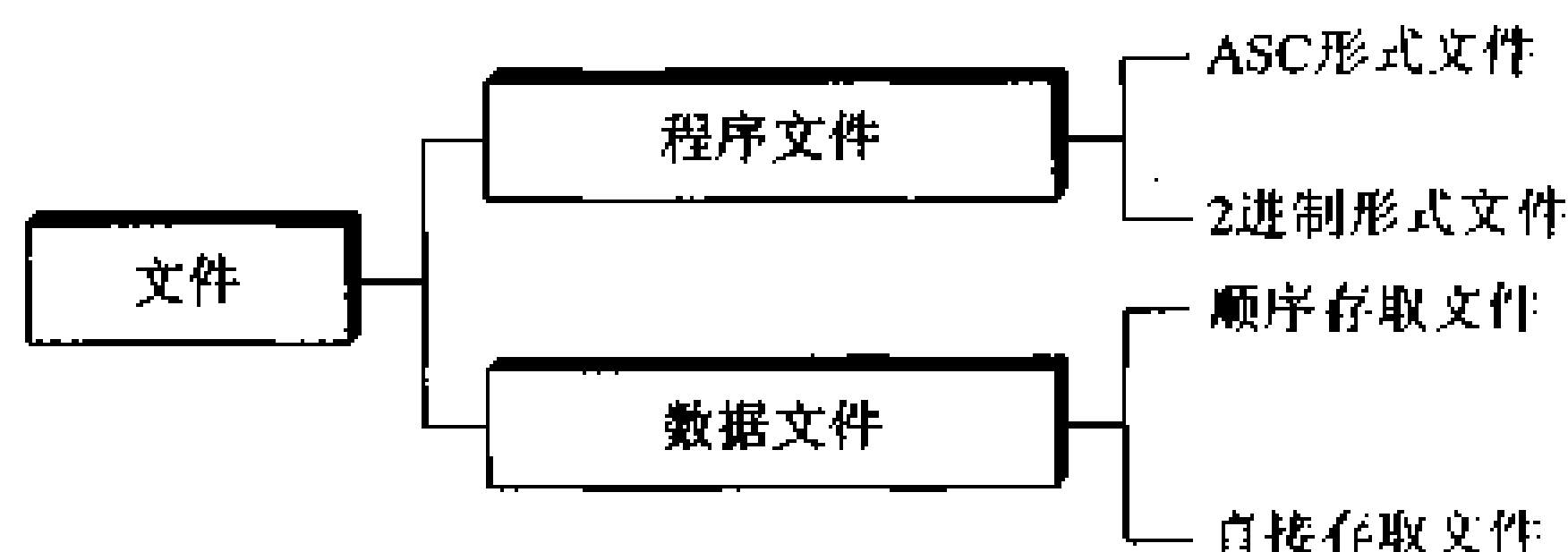


图 6.25 文件的分类

## □ 解 释 ● 程序文件

用于保存已编好的程序。程序文件有以下两种。

### ASCII 码形式文件

**ASCII 码形式文件:**构成程序的字符,每个字符都是以 ASCII 码形式记录的。汉字等全角字符也全是以转换 JIS 汉字编码记录的。这种程序的优点是可以广泛使用的文本编辑程序(text editor)进行编辑。

### 2 进制码形式文件

**2 进制码形式文件:**程序是用简化的 2 进制码记录的。因而与 ASCII 形式相比所需的记录空间也小,调用时间也短。

## ● 数据文件

### 逻辑记录

计算机处理的数据,多为如图 6.26 所示以多个项目组成。把这些项目的集合整理成一组就是记录。这样的记录称为逻辑记录。

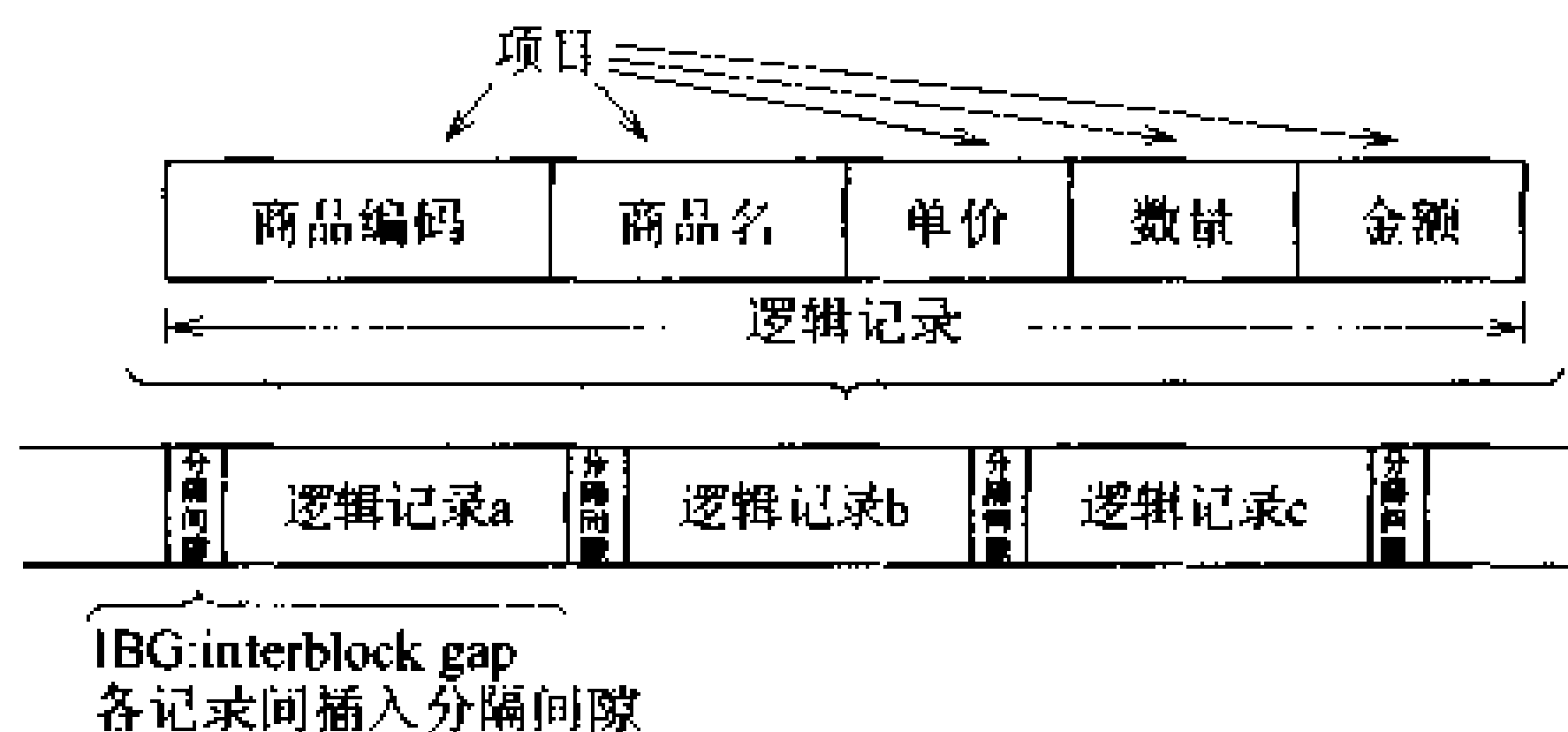


图 6.26 文件的构成

模块化  
物理记录  
非模块化

计算机中,读写命令是按逻辑记录的项目逐项进行的。但是,各项目间有一个分隔间隙(IBG;interblock gap),每作一个记录就要插入一个分隔间隙,因而效率低下。如图 6.27 所示,将好几个逻辑记录集合在一起作成模块化,情况立即得到改善。这种模块化的记录称为物理记录。相反,从物理记录分成逻辑记录的过程称为非模块化。

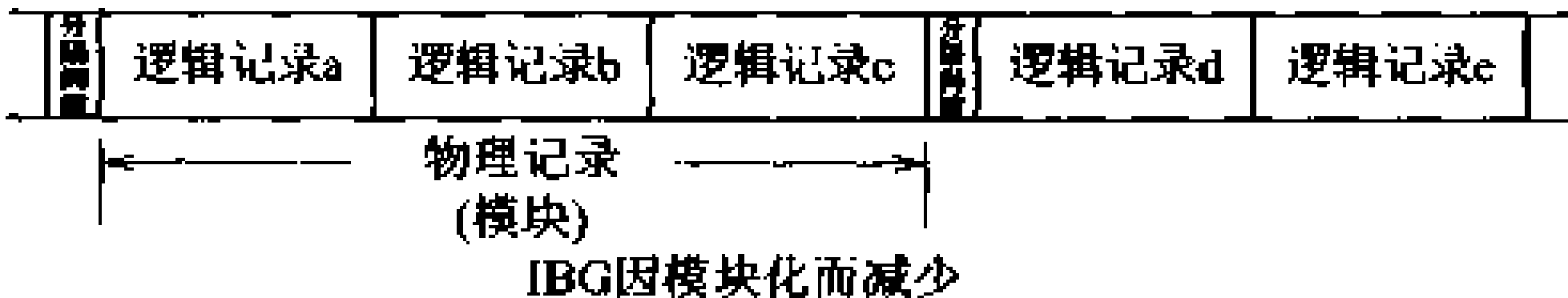


图 6.27 物理记录(模块)

模块化系数

在模块化中,为表示 1 块里集聚了几条逻辑记录而有模块化系数。例如,如图 6.27 所示集聚有 3 条逻辑记录时,模块化系数即为“3”。模块化的指定由用户进行,具体工作由 OS(操作系统)自动进行。

顺序存取文件

顺序存取文件,指的是顺序文件。其处理形式是从记录的头部开始顺序读写处理。常将多条记录作为一个模块处理,存储效率高,适用于总体处理。而不适于数据的插入、删除以及任意数据的读出处理之类的处理工作。如果考虑一下用于音乐的录音再生的盒式磁带录音机的工作情况,将非常易于理解。这种文件的典型代表有磁带、磁盘。

直接存取文件

直接存取文件,也称为乱处理文件或随机存取文件。可对目标记录直接存取。磁盘的每条记录上都带有地址,地址由盘片号、磁头号和记录号组成。只要一指定地址,磁头就会直接移向指定的记录进行读写。所以,增加、改正以及删除都很容易,因而利于对常修改的数据进行处理。这种文件适于磁头能够直接指向目的区的磁盘以及柔性磁盘。

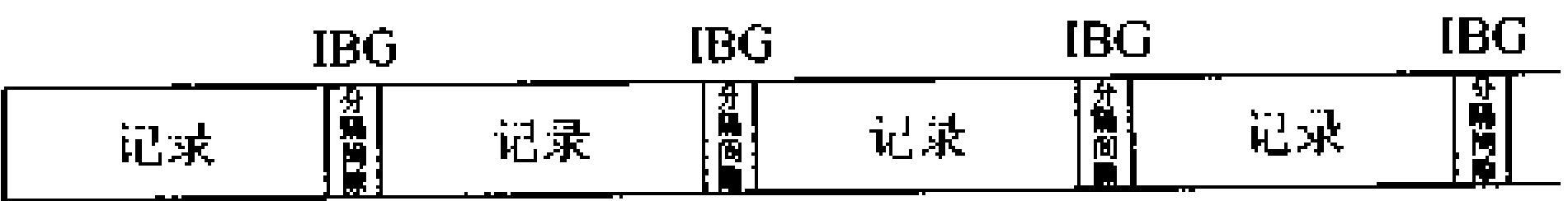
□ 相关知识

固定长度记录

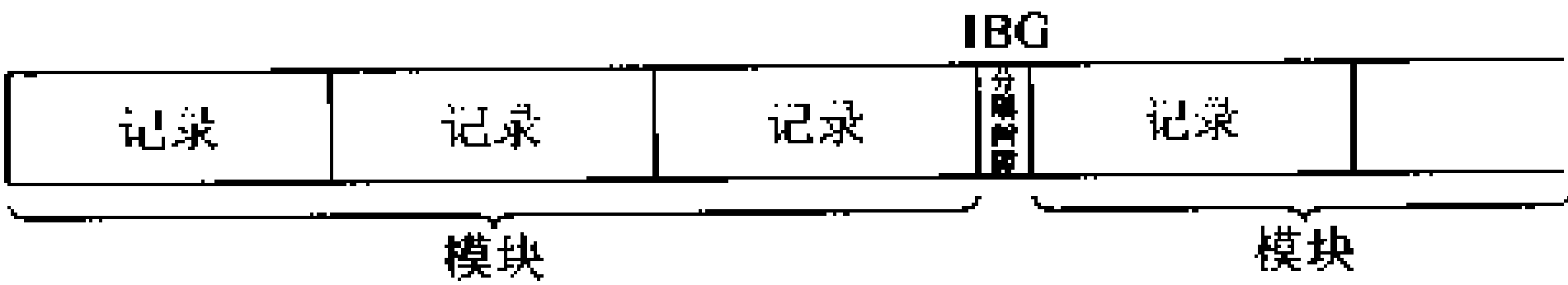
固定长度记录(F 形式:fixed length record),是记录长度(字节数)固定为一定大小的记录形式。有非模块化固定长度记录和模块化固定长度记录之分。

可变长度记录

可变长度记录(V 形式:variable length record),是长度不固定的记录形式。分非模块化可变长度记录和模块化可变长度记录。



(a) 非模块化固定长度记录

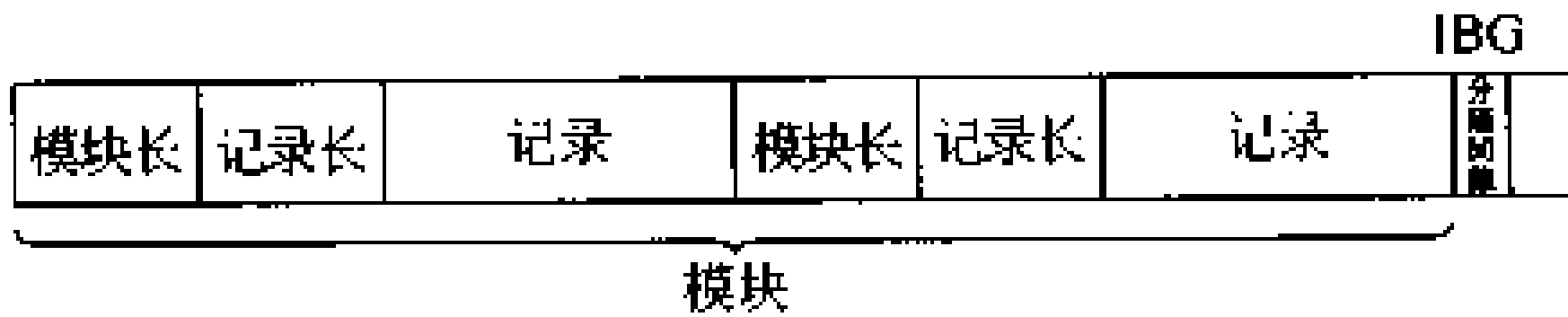


(b) 模块化固定长度记录

图 6.28 固定长度记录



(a) 非模块化可变长度记录



(b) 模块化可变长度记录

图 6.29 可变长度记录

# 13 个人计算机通信

□ 要 点

个人计算机通信,指的是连接个人计算机用户,相互间进行数据及信息交换。它属于数据通信的一种。在许多情况下,个人计算机通信使用的是电话线。电话线属于模拟线路,而计算机中处理的是数字信号,所以必须进行模拟信号与数字信号间的转换。

□ 解 释 ● 个人计算机通信的构成

① 调制和解调

个人计算机通信的基本原理如图 6.30 所示。需要使用调制解调装置进行信号转换。

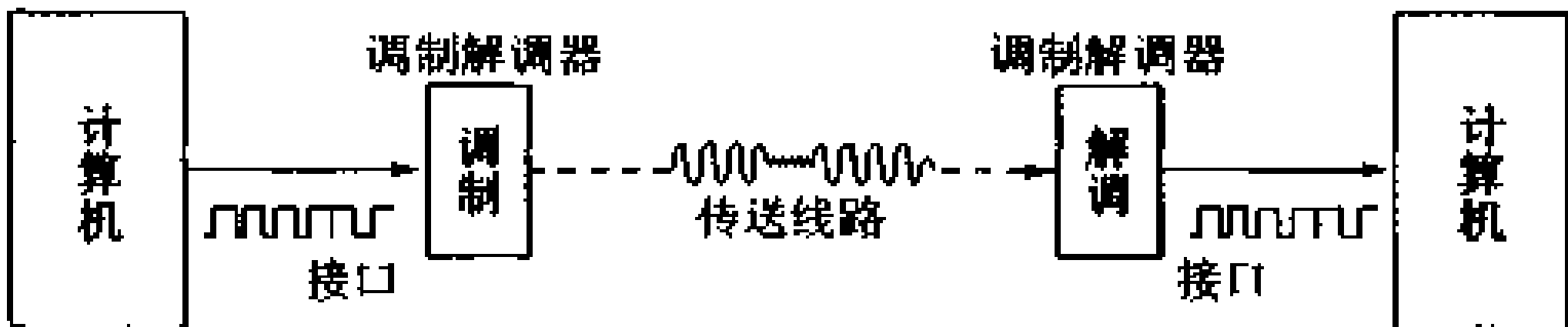


图 6.30 个人计算机通信的原理

发送方要将数字信号调制到模拟传送信号中,接收方则要进行相反变换的解调。

调制方式有调幅(AM)、调频(FM)、调相(PM)、脉冲编码调制(PCM)等多种。图 6.31 示出了调制及信号波形。

接线

② 接线

要进行通信,必须与电话线连接。电话线只适于模拟传送而不适于数字传送。所以,就要如图 6.30 所示,通过调制解调器将计算机与电话线连接起来。然后,启动通信用软件,进行种种必要的设定。当输入键盘命令,公告牌系统(BBS: bulletin board system)一出现信息显示,接线即告完成。

BBS

③ BBS 服务实例

电子邮件

① 电子邮件:用户间通过 BBS 相互交换文件。最近,大手公司的计算机通信服务器也与互联网进行连接。这样一来,用户就可以通过互联网,向即使加入的是与自己不同的网络的对方发送电子邮件。

互联网,当初是科学研究人员的网络与其它商用网络的联接,随着企业及一般用户的增加,如今正在发展成为愈以巨大的网络。

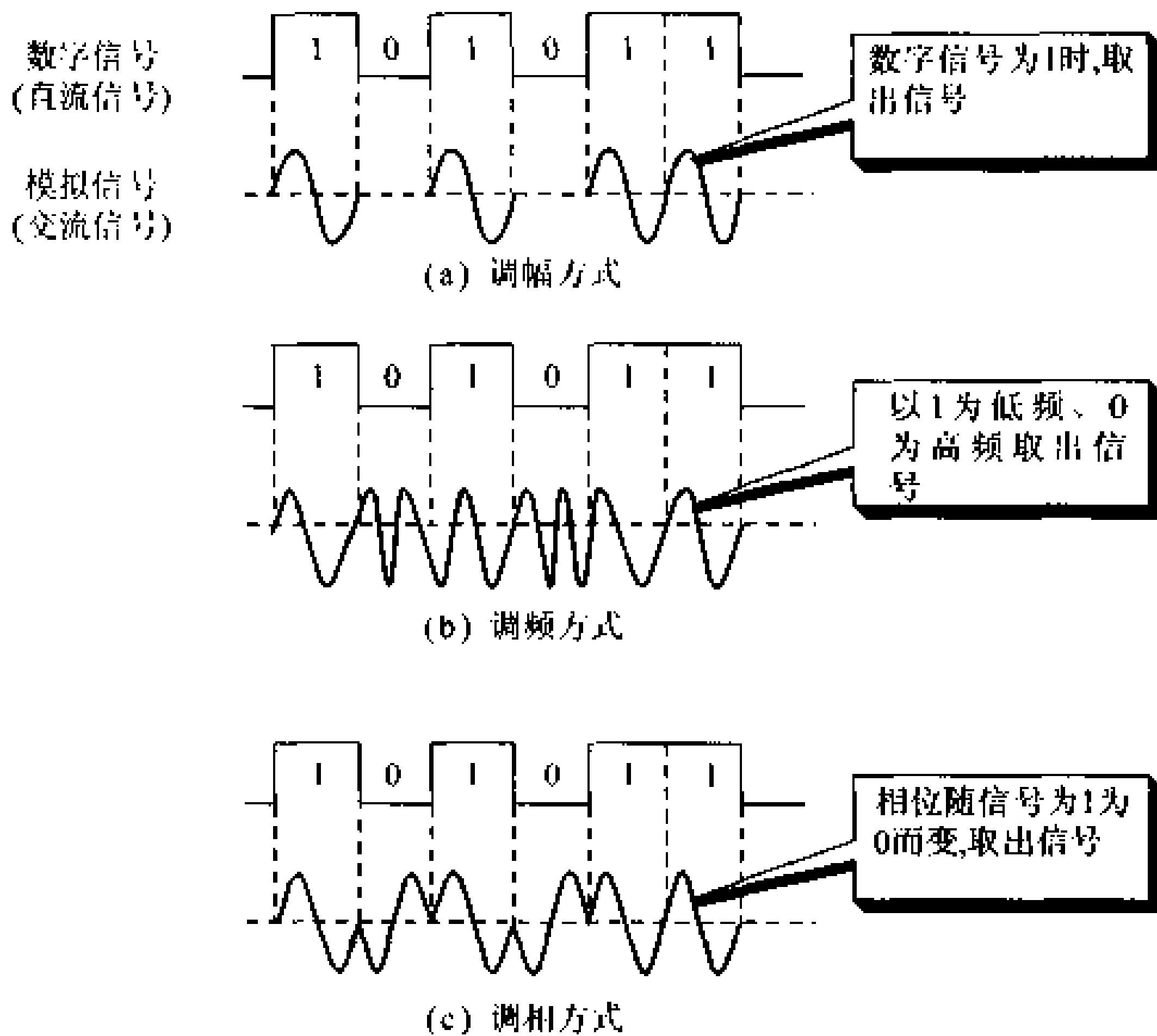


图 6.31 调制方式

据说用户已达数百万人。

### 网上聊天

② **网上聊天** 输入的信息实时显示于会员的显示器上,远处的会员可通过键盘输入进行会话。形式就像聊天。通常是在与同一主机相连的各个人计算机间进行,但是,属于 LAN 等网络内的计算机用户相互间也可进行。

### 论坛

③ **论坛** 同一论题下使不同层次间能够交换信息。通常,按照论题分组作成层次结构,且多设置有会员可以互相利用的数据资料以及免费软件等。

# 14 计算机网络

## 要 点

网络是由相互连接的多个计算机系统构成的。它使单独不可能处理的问题的处理成为可能,并且正在向着大规模化发展。

## 解 释

### ● 局域通信网(LAN:local area network)

是指同一建筑物或学校内狭小的地域上分散设置的计算机间进行通信的网络。其方式有总线方式、环路方式和星形方式之分,分别显示于图 6.32 中。

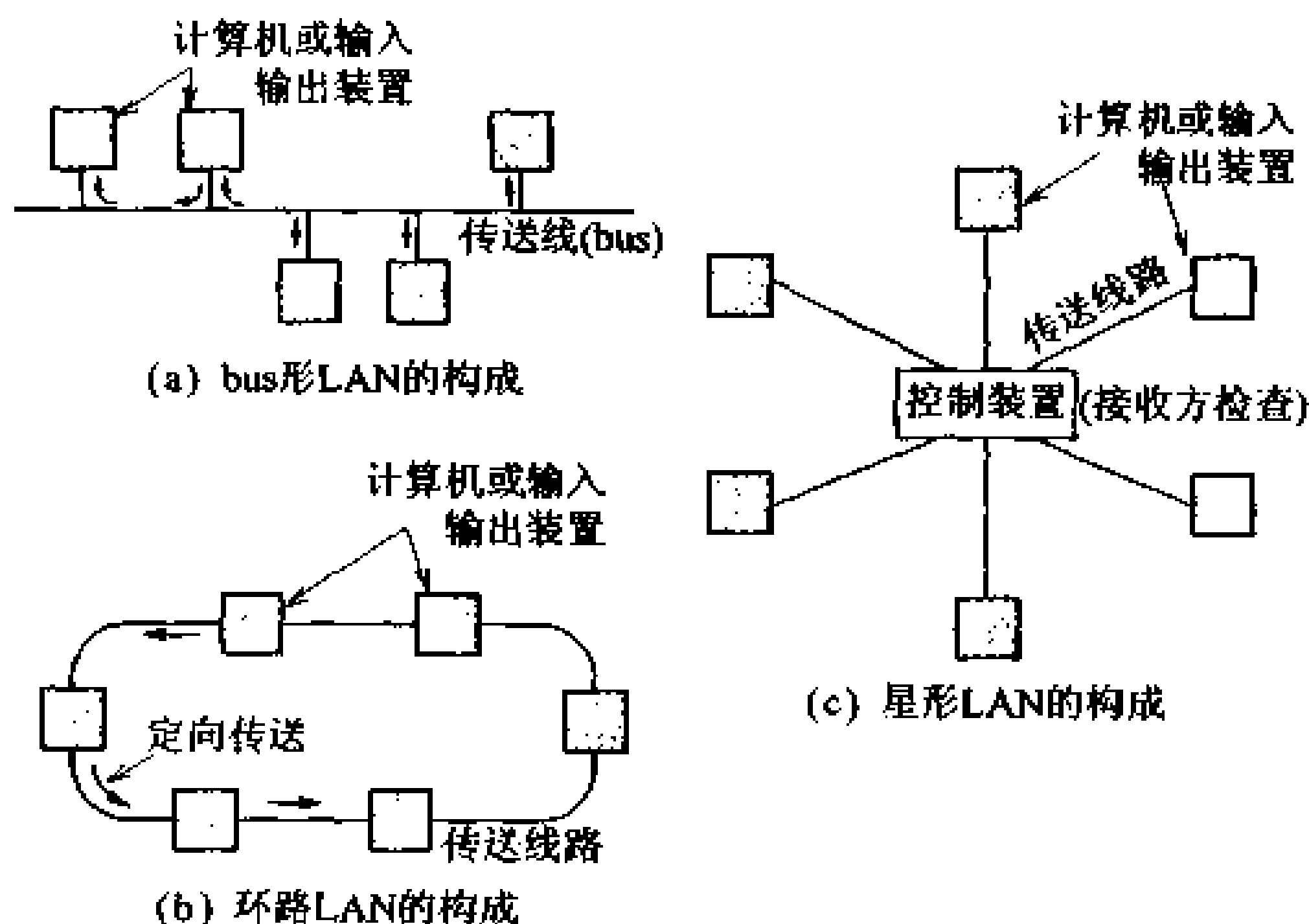


图 6.32 LAN 的方式

### 总线方式

① 总线方式 共用一根传送线(总线)与各装置相连,发送的数据被所有的装置接收,各装置判断接受发给自己的信息。

### 环路方式

② 环路方式 各装置连在环形的传送线路上,数据仅向一个方向传送。收到数据的装置,首先要检查读取的数据是否是送给自己的。是自己的就读入,不是就送给下一装置。

### 星形方式

③ 星形方式 通过位于中心的控制装置用传送线路相连接。在控制装置中检查传送数据的接收方。

### ● LAN 的两种形式

基本的 LAN 是由提供服务的服务器和利用此服务的客户组

成的。LAN 的种类及构成因其用途及规模而异。

#### 一对一式

##### ① 一对一式

接在 LAN 上的计算机、各自都具备服务器功能和客户功能,相互之间可以利用其硬盘及打印机等。此种形式常用于小规模 LAN,原则上用同一机种构成。

#### 客户-服务器式

##### ② 客户-服务器式

必须有一专用服务器,服务器和客户机各自任务分担明确。使用可以高度灵活。但安装、设定与管理复杂,需要专业知识。

如果要对服务器进行分类,可以分为硬盘或光盘共用的文件服务器、担任打印处理的打印服务器、驱动服务器用应用程序的应用服务器以及担任通信处理的通信服务器等。

### □ 相关知识 ● 计算机犯罪

#### 病毒

随着网络的普及,网络犯罪有逐渐增多的趋势。利用银行的在线系统篡改数据、进入网络破坏数据、更有甚者向公开的软件里放置病毒,将用户的计算机搞乱等等犯罪行为频频发生。

计算机病毒,从单纯的恶作剧到一经感染就繁殖并通过网络广泛传播的,多种多样。为了不感染这些病毒,不要拷贝别人的便宜软件。如果知道已经感染病毒,就不要使用那些软件。为对付这些病毒,还可使用称为发现、杀除病毒的疫苗的软件。

#### ● VAN

#### WAN

与 LAN 相对应、连接相互远离的计算机系统的计算机网络称为 WAN(广域网;wide area network)。其代表有 VAN(value added network)。VAN 中,是将计算机连到网络上提高其附加价值,可供第三者用来进行数据传送以及数据交换。

# 15 模拟和数字转换

□ 要 点

声音信号数字化中有脉冲编码调制方式(PCM)。

□ 解 释 ● PCM(pulse code modulation)

采样 量化  
编码

PCM 方式包括采样、量化和编码三种操作。采样就是将连续变化的模拟信号,以时间上离散的形式(即脉冲)将其取出的操作。量化就是为了对取出的采样脉冲进行编码而进行的圆整舍入操作。编码就是将由量化得到的值用 2 进制数表示。

解码

数字电路把编码后的模拟信号变为数字信号后送到传输电路,接收端进行解码(decoding),最后通过滤波器再现原来的模拟信号。

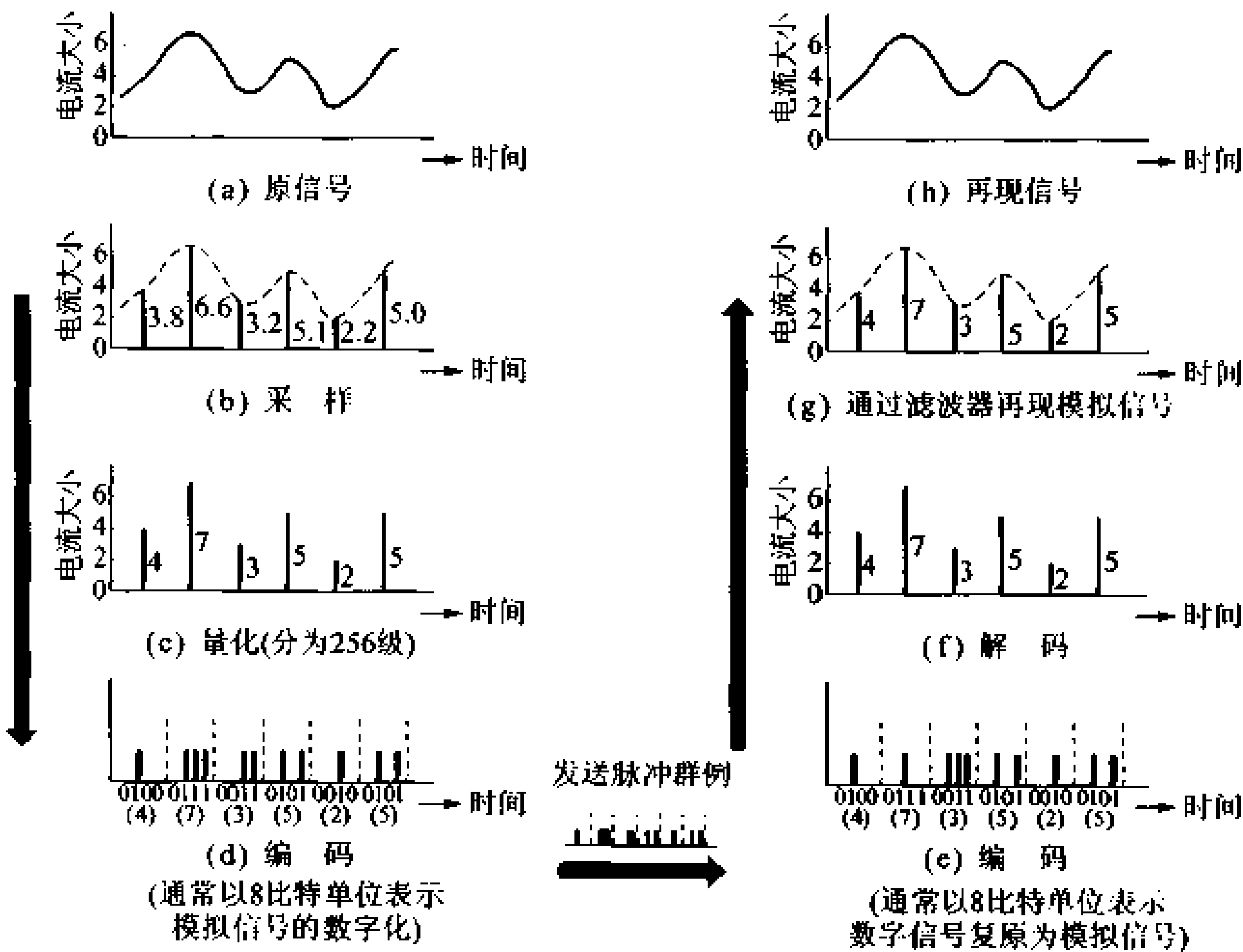


图 6.33 编码和译码



## 数字信号处理器(DSP)

数字信号处理,一般是由计算机进行的。为了高速进行这种信号处理,需要高性能的 MPU。为此,需要制作的是专用的 DSP 芯片。DSP(digital signal processor)能实时实现数字信号的压缩与扩展,并且还具有提高通讯速度和减少线路数目以及用少的存储容量就能完成任务等多种优点。

像 CD(compact disc)机那种大批量生产的产品中,使用的 DSP 是将所有处理逻辑电路放在一块芯片内。在复制音乐等时,要判断 CD 的数据是否正确读入,如果这一数据由于 CD 盘表面损伤而出现错误时,就需要进行修正。

DSP 现在主要用于 CD 机,也用于手提电话机、硬磁盘驱动装置等,可以预见其用途会越来越广泛。下图给出了 CD 机的 DSP 内部的处理流程。

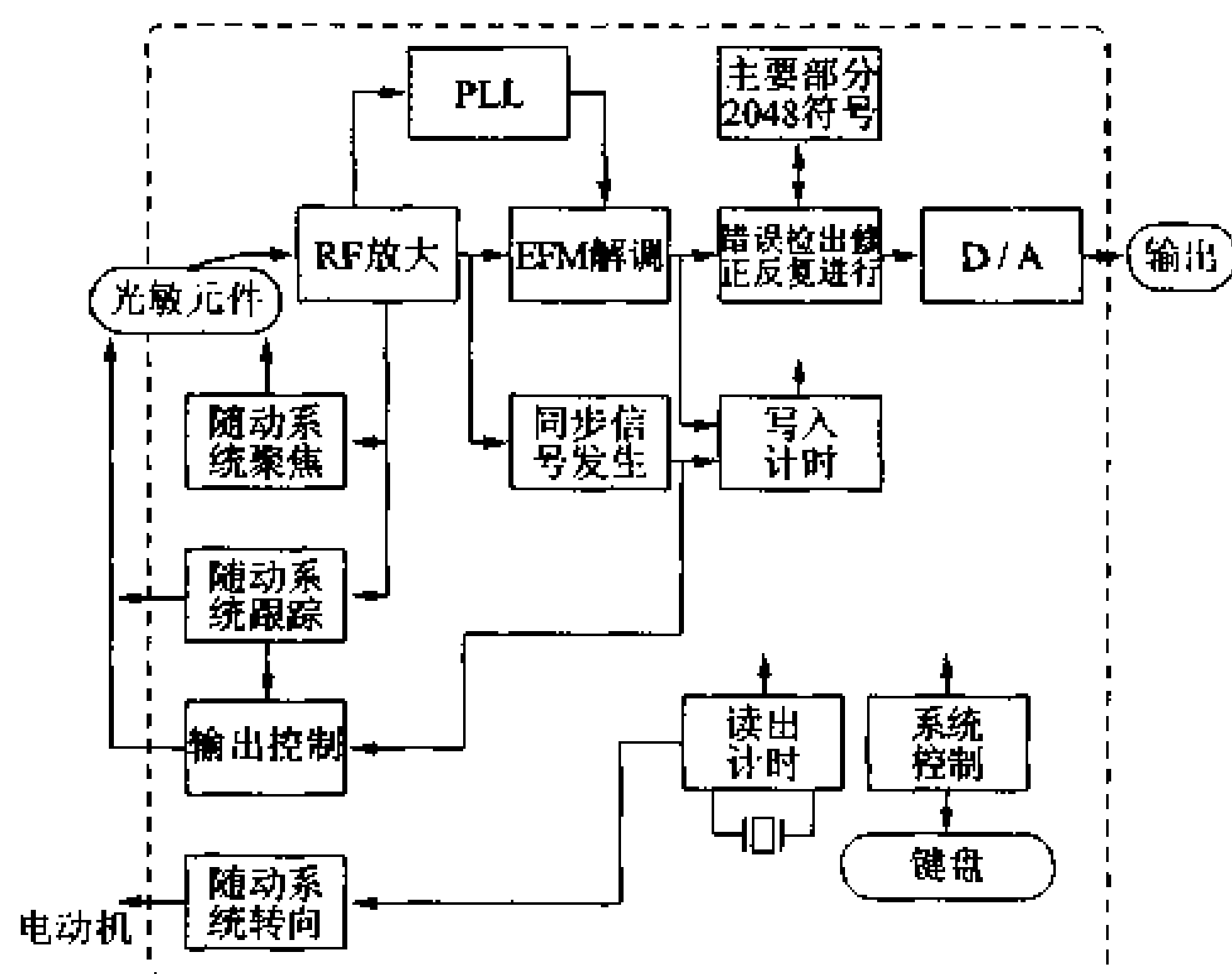


图 DSP 内部系统的流程

## 第7章

# 电子控制

所谓控制就是为了对应某一目的而进行的操作。控制最基本的考虑方法是来源于人类以前工作的总结。是为了为人类营造更加舒适的生活。

控制类别大体上可分为：按预先设定的操作次序逐一进行操作的顺序控制；一面与目标值进行比较一面反复进行修正，最后的输出结果达到和目标值相一致的反馈控制。

这些控制多以一般家庭使用的各种电气产品为主，当然还有汽车燃料的喷射和电梯的运行等控制。另外，还有工厂等产品的搬运和组装中使用的机械手等广阔领域中的控制。

- 责任编委

小市直人

- 执 笔

小市直人(12~18)

新井义博(1~11)

加藤清志(19~21)

# 1 什么是顺序控制

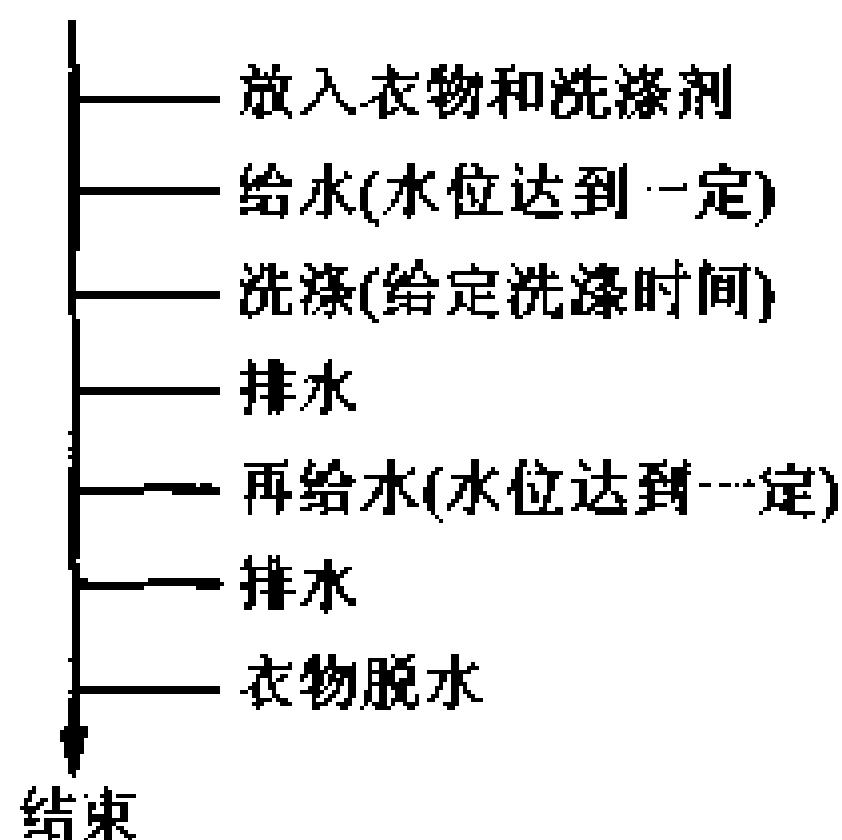
## □ 要点

大家都用一句话说出控制(control),其说法有各种各样的。将其中控制次序预先设定的控制称为顺序控制(sequential control)。

在日本工业标准(JIS)中,有“按照预先设定的顺序逐一进行各阶段的控制”。也就是说,预先设定的各阶段的控制动作,在一个动作完了或者经过一定时间之后,再次移到下一个动作,即为顺序控制。

## □ 解释 ● 顺序控制

代表性的顺序控制有机械的自动运转。如家庭洗衣机的顺序控制,就是其中的一例。如果归纳一下洗衣机的一系列动作,有:

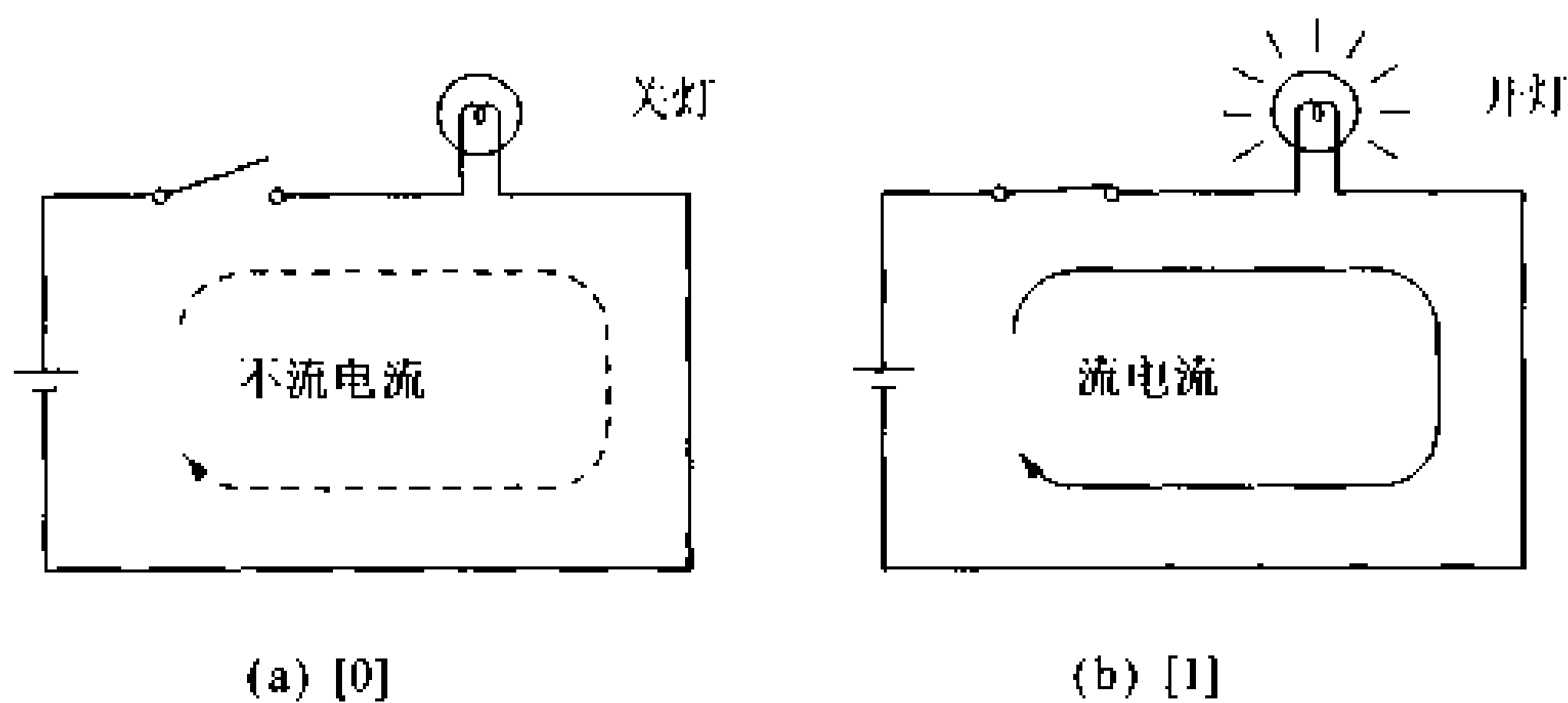


将这一系列操作进行自动化,就说这样的洗衣机是自动洗衣机。在自动洗衣机中有各种各样的控制器件。

在给排水中,要有关与开给水孔的自动开关以及为了一会洗一会涮的大功率电动机的运转。同时还要有感知水位的浮子和为了给定洗涤时间和洗涮时间的计时器等等。然后按照使用的先后顺序将它们自动化,再把它们组装起来,最后才是一台自动洗衣机。

顺序控制因为是把控制顺序比较清楚的作为控制目标,所以它适于工作机械自动化和电梯运行等的控制。

顺序控制一般是在开关和继电器,或者开关和计时器多种形式任选其一进行处理的。在有触点继电器中,其2值逻辑是:触点关为1,开为0;而无触点继电器中,电压高为1,低为0。图7.1给出了2值逻辑例子。



	灯	接点	电压
0	关灯	开	低
1	开灯	合	高

图 7.1 2 值逻辑

● 顺序控制的构成

顺序控制构成如下：

- ① 运转指令部分 将人们发出的指令传达给控制部分，主要是开关。
- ② 控制部分 是用 2 值逻辑而进行的控制部分。
- ③ 执行部分 也叫驱动部分，主要是电动机。
- ④ 检测部分 是限位开关等的传感器部分。
- ⑤ 监视部分 是将控制状态告知人们的部分，指示灯等。

## 2 控制中所使用的开关动作

### □ 要 点

在顺序控制中,为了操作控制动作的起动和停止,控制机器的各种开关是不可缺少的。开关有:只要按下按钮,开关就动作,一放开手就回到原始状态的按钮开关和用接触告知位置的微动开关等。这些都是具有代表性的开关。

### □ 解 释 ● 开关的作用

按钮开关一般使用弹簧,将手一放开,就能自动回到原始状态。

它的端子有 COM 端(common:公共)和 NO 端(normally open contact:常开触点)以及 NC 端(normally close contact:常闭触点)。它能进行“按下按钮时闭合,离开按钮时电路断开”和“按下按钮时电路断开,离开按钮时电路闭合”的两种动作。

按下去,电路导通,使用端子 COM 和 NO;按下去电路断开则使用端子 COM 和 NC。

将使用端子 COM 和 NO 的叫作 a 型触点(常开触点),将使用端子 COM 和 NC 的叫作 b 型触点(常闭触点)。

c 型触点是 a 型触点和 b 型触点共用 COM 端子的切换点。如果使用 c 型触点,不按下按钮时,端子 COM 和端子 NC 之间导通。按下按钮时,端子 COM 和端子 NO 之间导通。

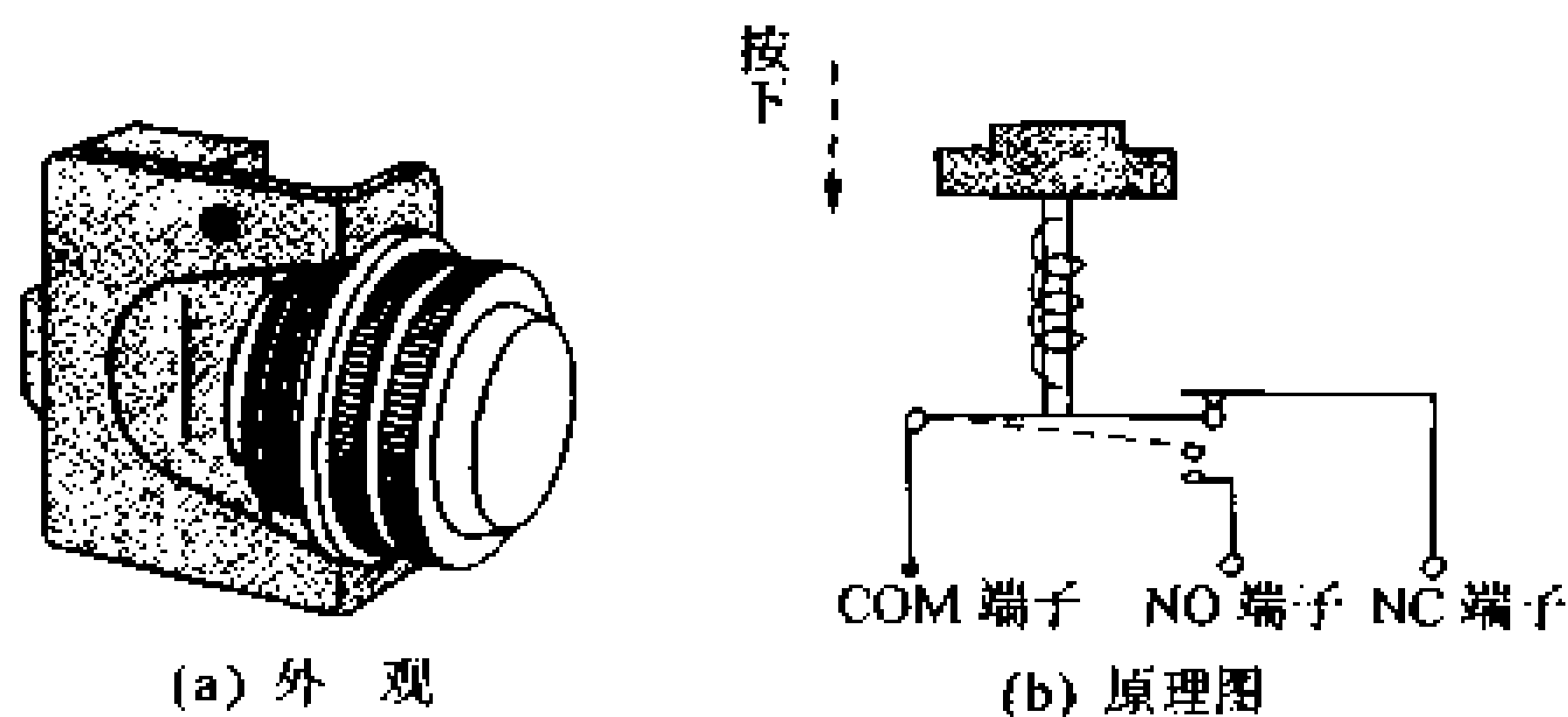


图 7.2 按钮开关

按钮开关如图 7.2 所示。图 7.3 给出了 a 型触点, b 型触点和 c 型触点的图形符号。

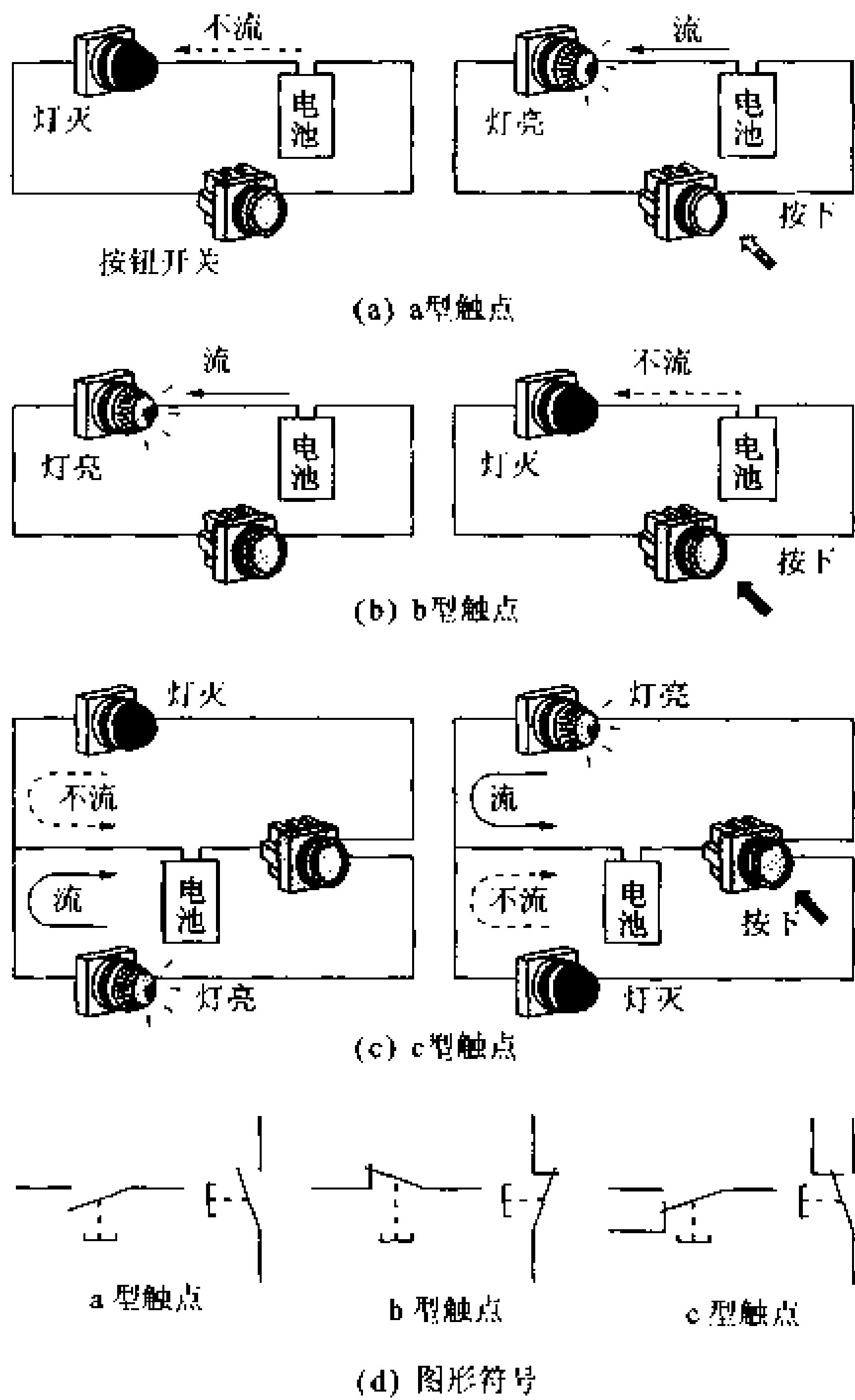


图 7.3 a 型触点, b 型触点, c 型触点

□ 相关知识 ● 触点

a 型触点的 a 是英文 arbeit contact 的字头, 是工作触点的意思。

b 型触点的 b 是英文 break contact 的字头, 是开断触点的意思。

另外, c 型触点的 c 是英文 change-over contact 的字头, 是切换触点的意思。

### 3 触点电路(电磁继电器)

#### □ 要 点

电流一流过电磁继电器的电磁线圈,由于电磁力的作用就会开合触点。在程序控制中,电磁继电器是不可缺少的电器。

#### □ 解 释

##### ● 电磁继电器的动作和复位

电流一流过电磁继电器,与可动衔铁相连的触点与固定触点之间就进行关与开,于是,电路也就断与通。把触点开合的过程叫作电磁继电器进行工作。同时把由于失去电磁力,弹簧复位到原来状态称作电磁继电器复位。图 7.4 给出了电磁继电器的结构。在图 7.5 里又给出了电磁继电器的图形符号。

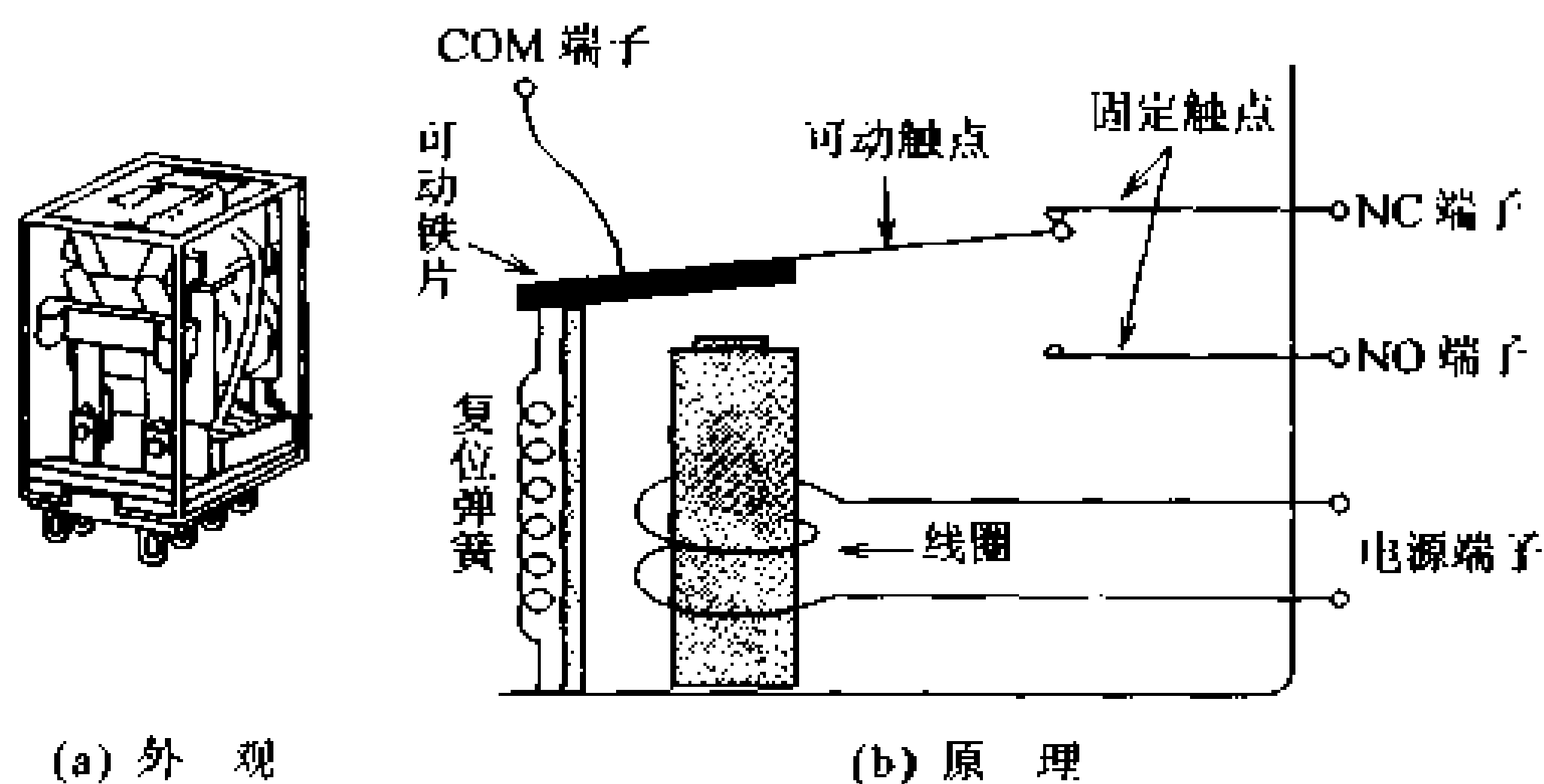


图 7.4 电磁继电器的结构

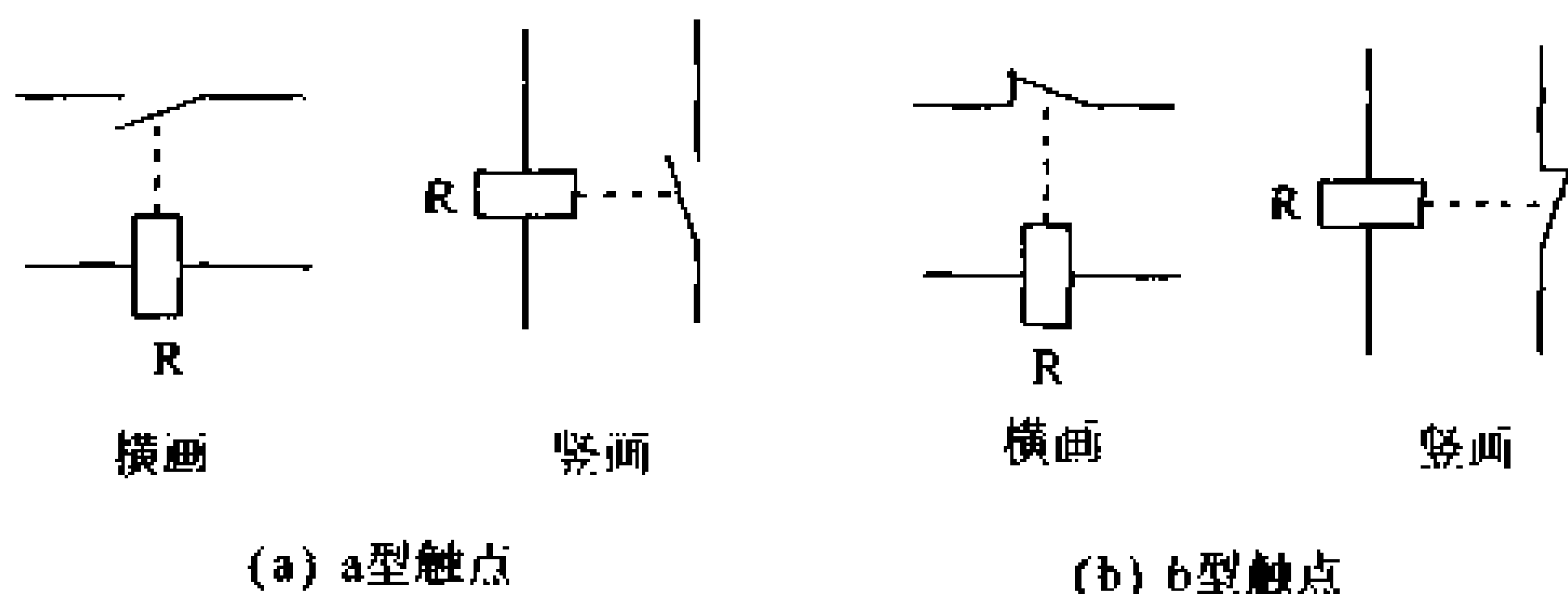


图 7.5 电磁继电器的图形符号

电磁继电器一般具有 COM 端子、NO 端子、NC 端子的触点共 1~8 组,可同时控制若干个电路。

● 电磁继电器的 a 型触点动作

如图 7.6 所示,其动作为

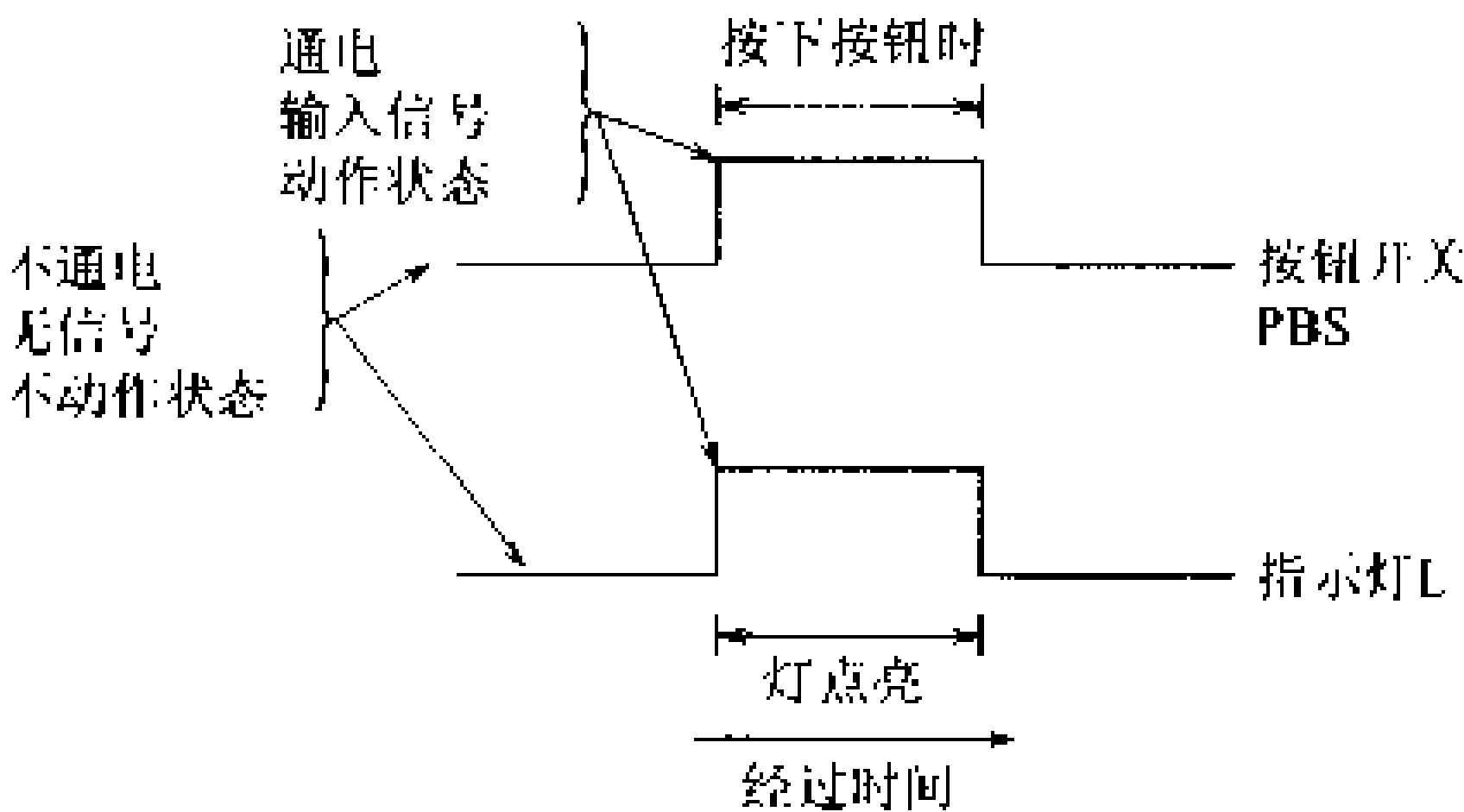


图 7.6 电磁继电器的 a 型触点动作

- ①按下开关 PBS;
- ②电流流过电磁继电器的线圈 R 后,它就成了电磁铁,使可动触点闭合;
- ③由于电路闭合而流有电流,指示灯 L 点亮。

□ 相关知识 ● 时间图

时间图就是以横轴为时间轴,图示出各机器的动作。如果将上述的动作画成时间图,就是图 7.7。

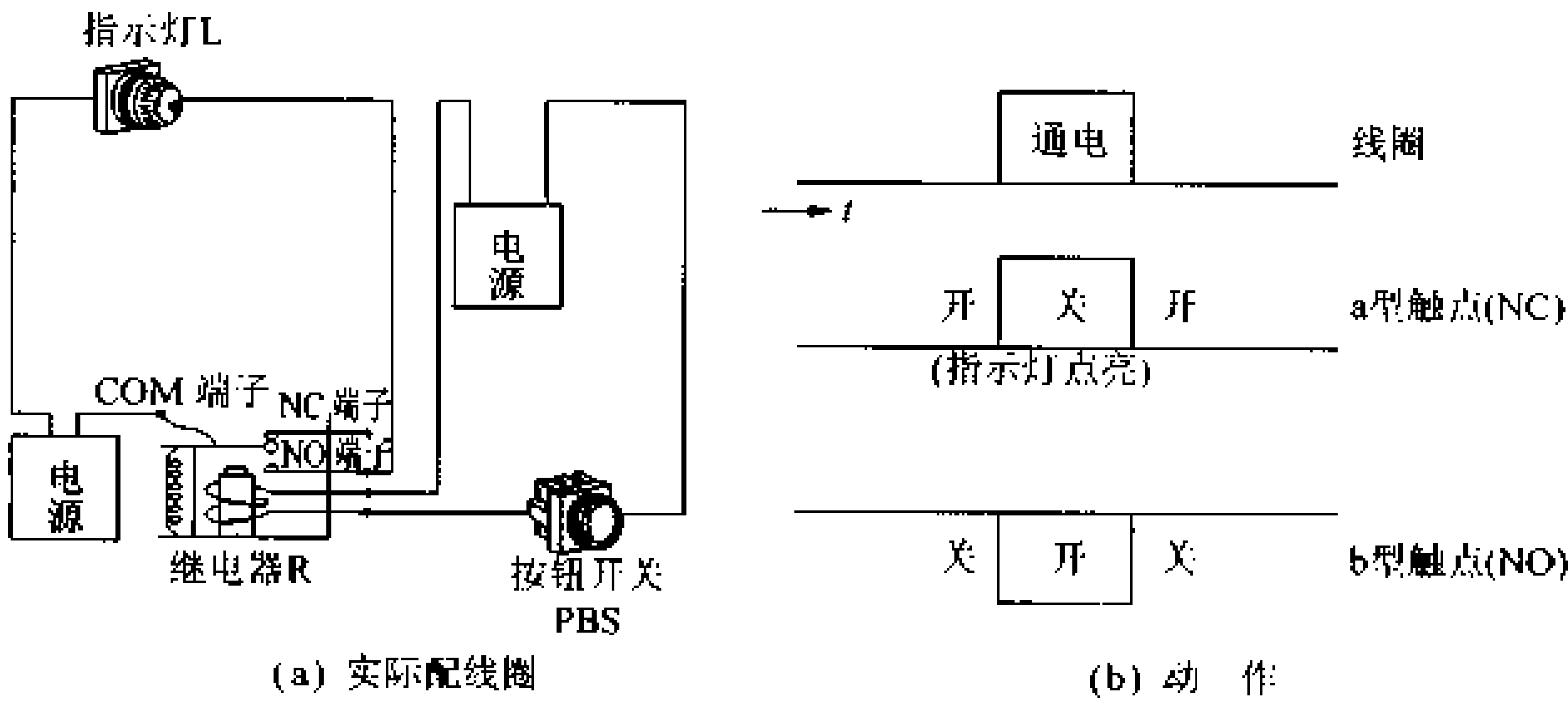


图 7.7 时间图



## 4 无触点电路(半导体元器件)

### □ 要点

相对于具有机械可动触点的电磁继电器来说,无触点继电器是采用晶体管和二极管等半导体元件,把触点的[断]和[通]用电压的高(为1)和电压低(为0)来表示。将具有这样动作的继电器称为无触点继电器。同时,将采用了无触点继电器的电路称为无触点电路。

### □ 解释 ● 无触点继电器

如果合上图 7.8(a)里的开关 S,因为有基极电流,故集电极电路中亦有电流,所以,指示灯点亮。图 7.8(b)是使用电磁继电器进行相同动作的电路。

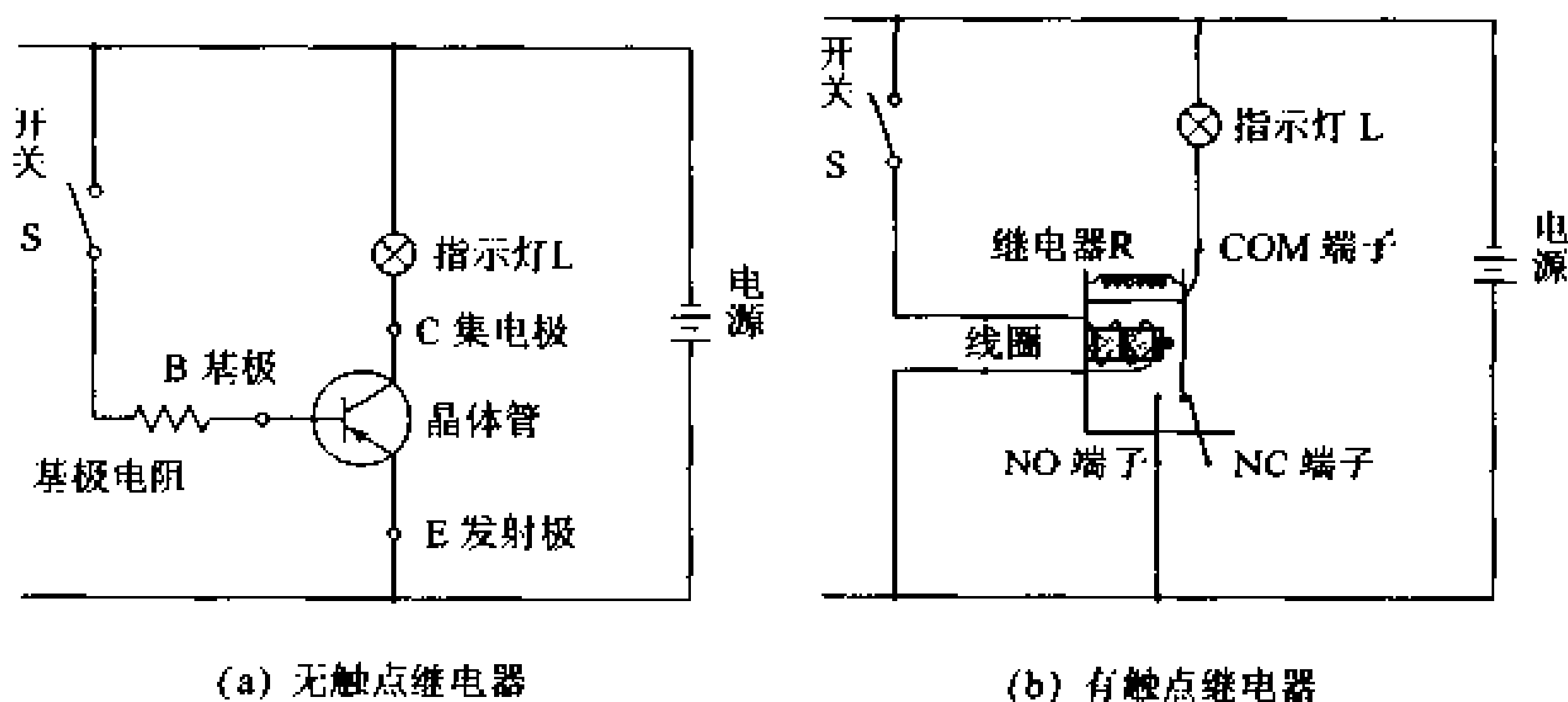


图 7.8 无触点继电器和有触点继电器

无触点继电器的优点是动作速度快、寿命长、耐机械振动、耐冲击性好、消耗功率小以及装置可小型化等等。它的缺点是易受电的噪声和浪涌电流以及温度变化等影响。

当无触点继电器的电压低(有触点继电器时是打开)时,因为这时没有电流流过,所以把这种状态叫做置“0”,当无触点继电器的电压高(有触点继电器时是闭合)时,因为流有电流,故称置“1”。

### □ 相关知识 ● 继电器电路和逻辑代数

如图 7.9 所示,设开关 X(a 型触点)为输入触点,设电磁继电器 A(a 型触点)为输出触点。如果输入 X 置“0”(没有接通开关 X),

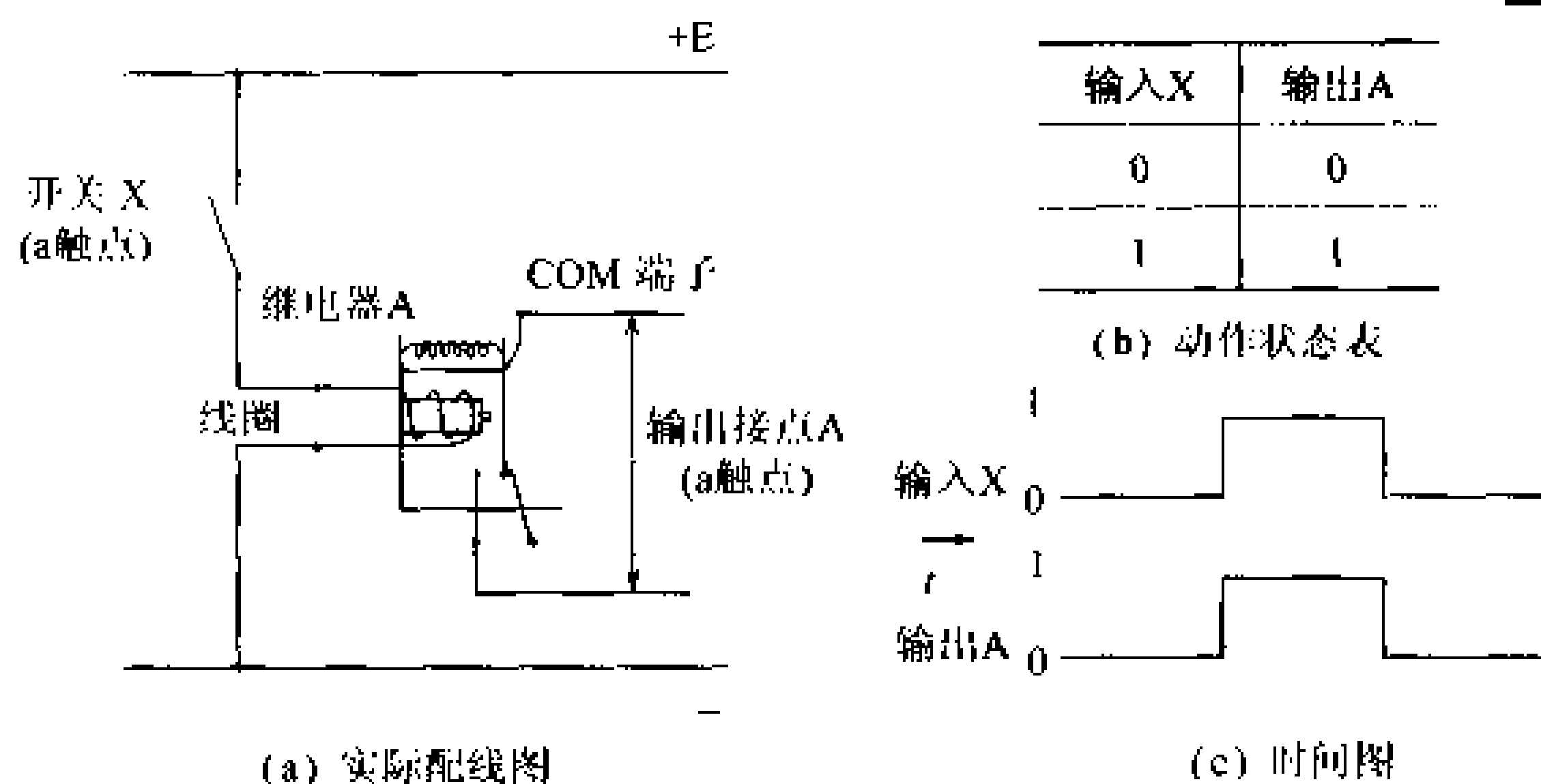


图 7.9 逻辑代数

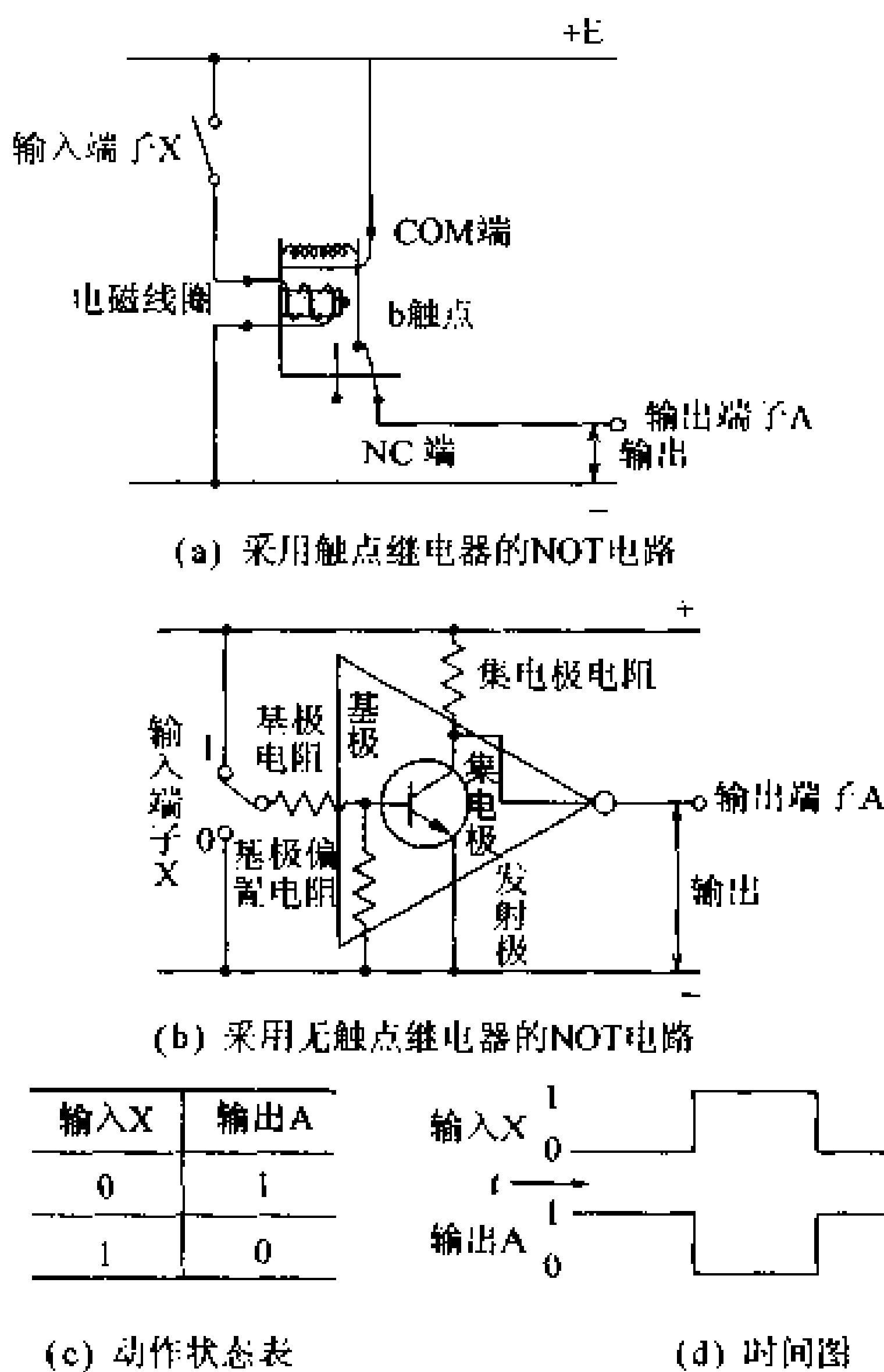
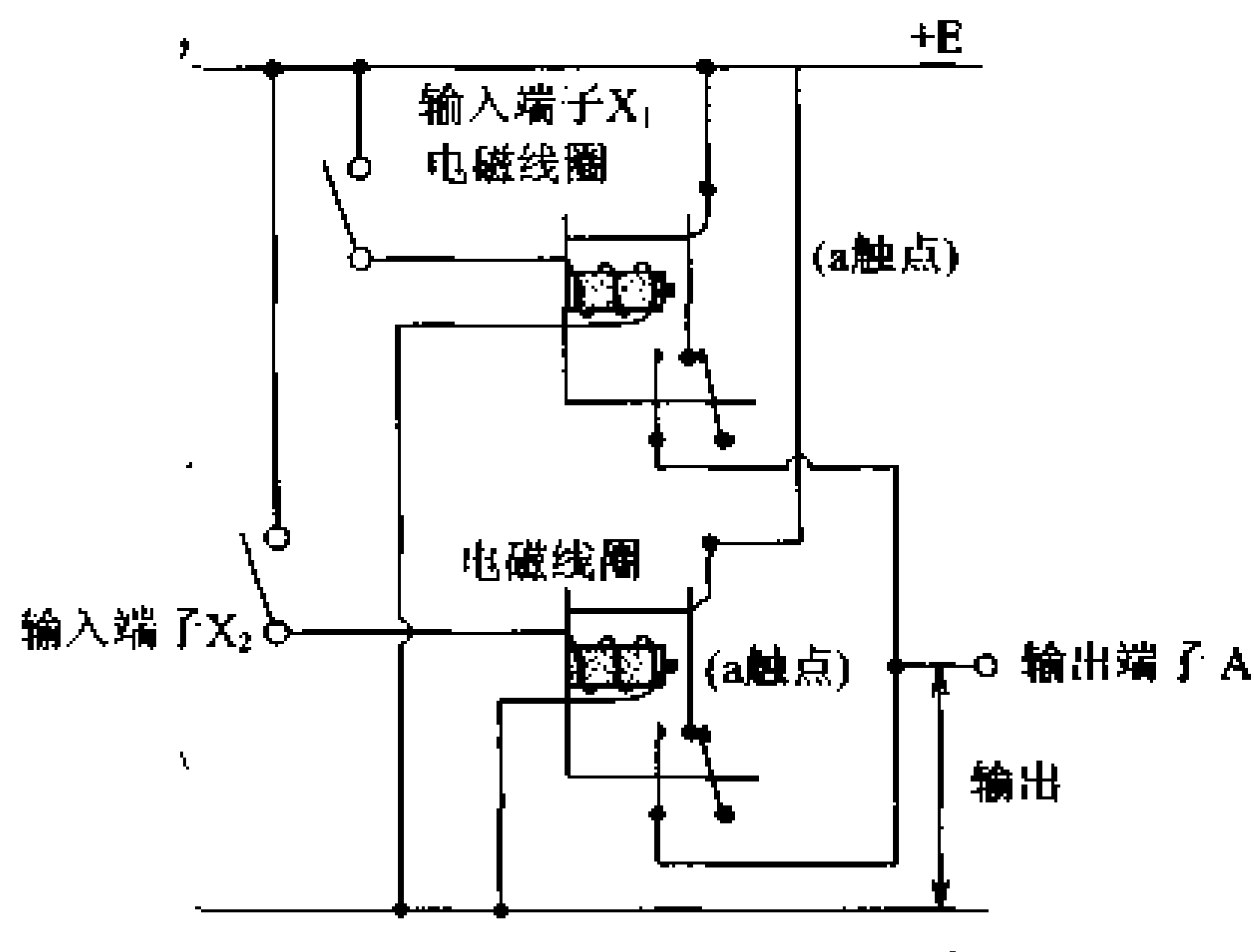
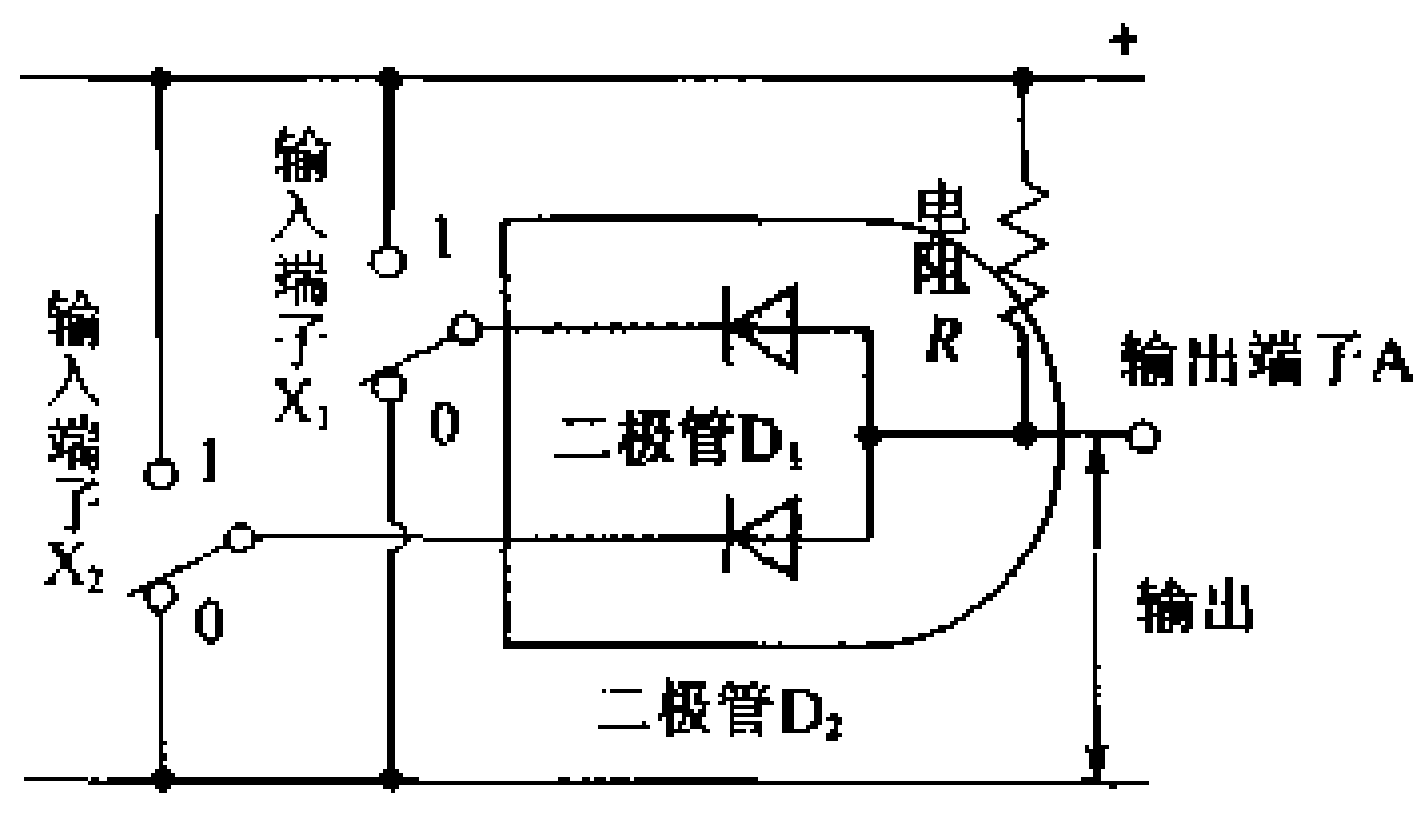


图 7.10 有触点和无触点继电器的顺序电路(其 1)



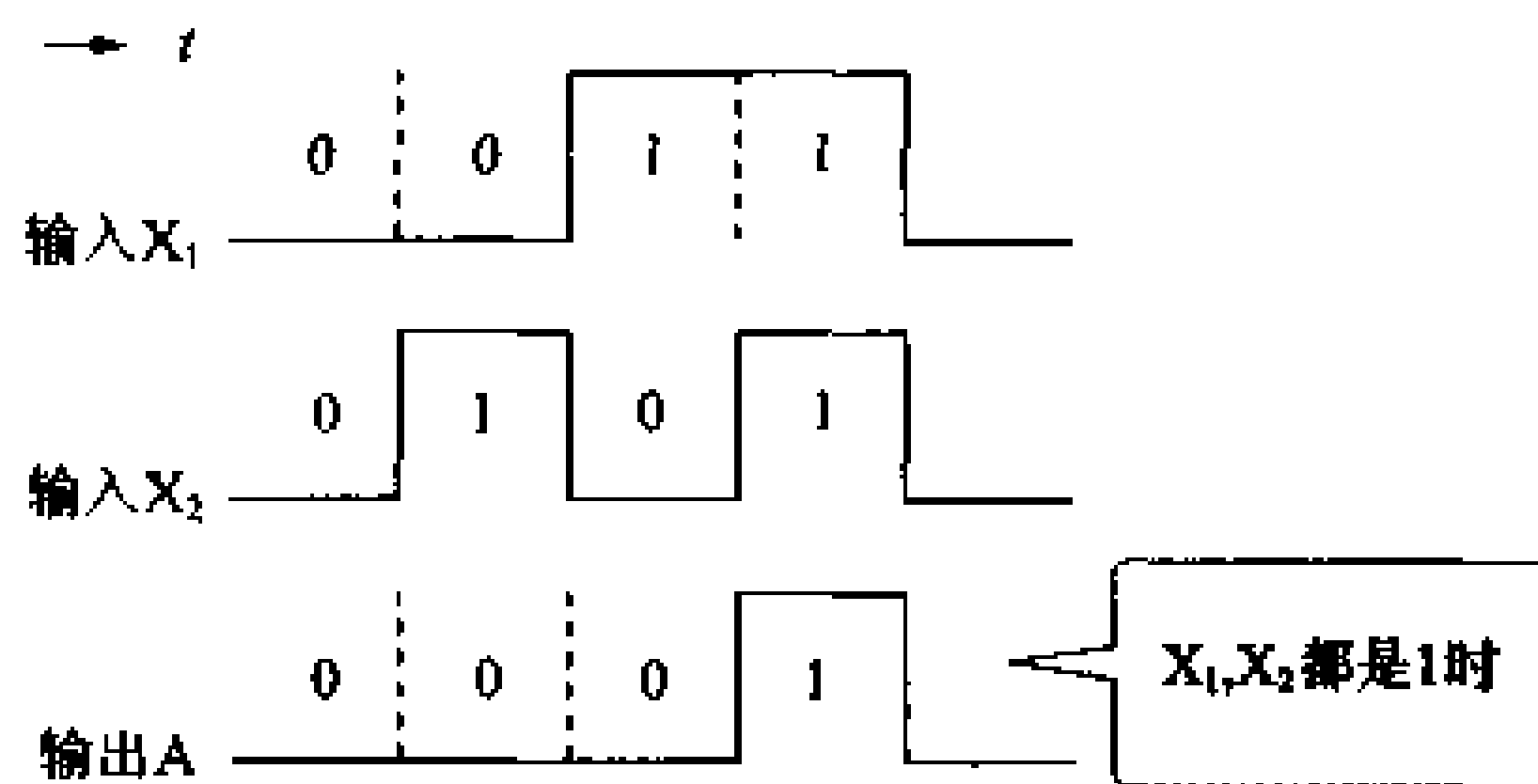
(a) 采用有触点继电器的OR电路



(b) 采用无触点继电器的OR电路

输入		输出
$X_1$	$X_2$	A
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(c) 动作状态表

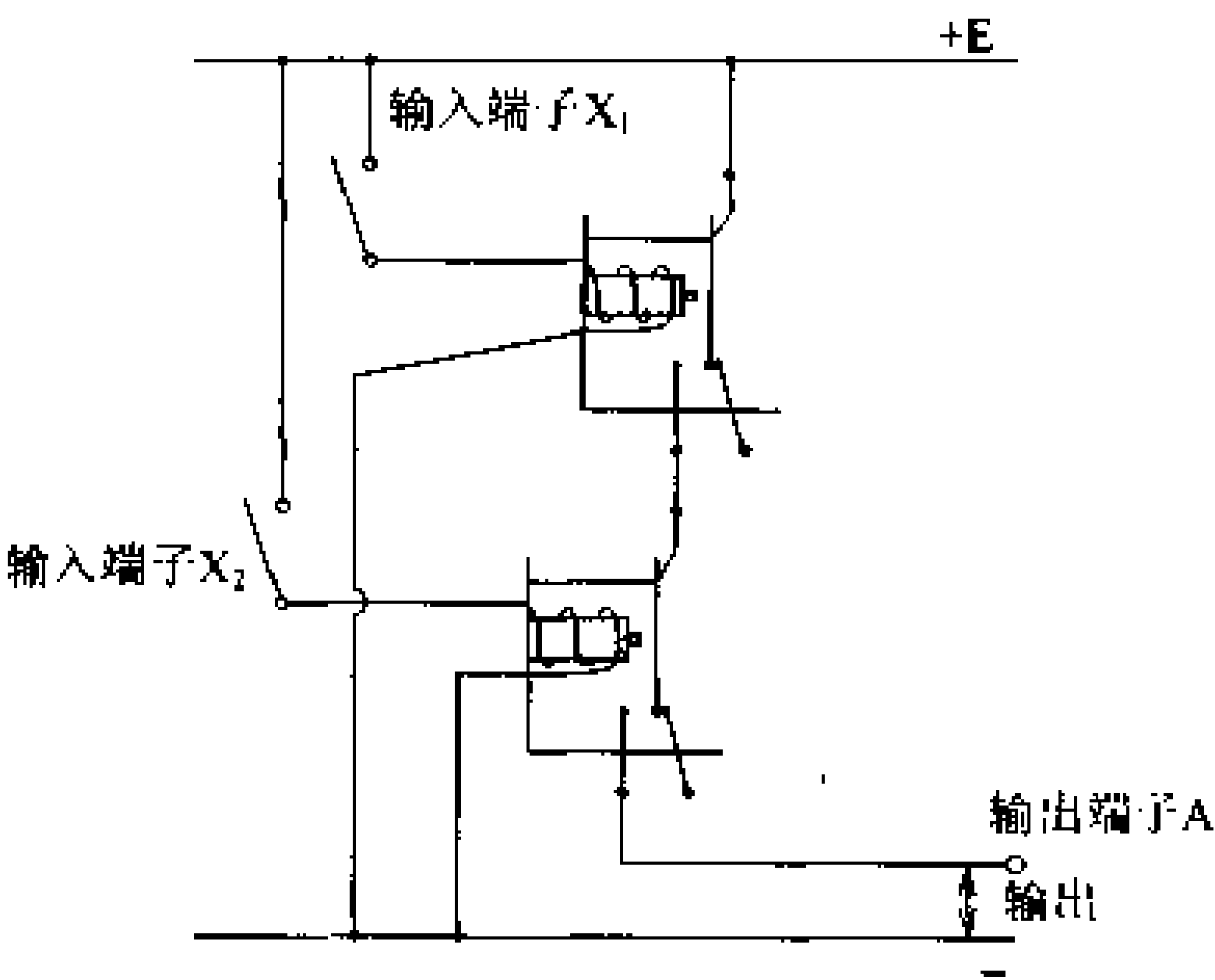


(d) 时间图

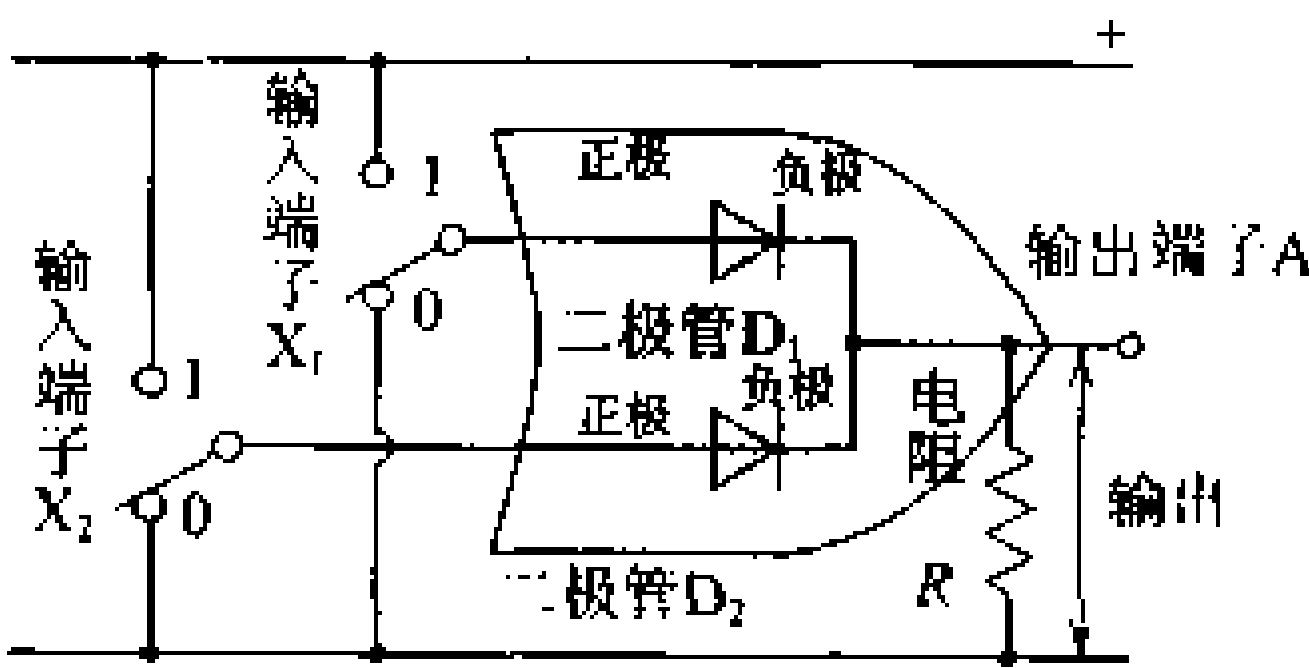
图 7.11 有触点和无触点继电器的顺序电路(其 2)

则输出 A 就是“0”(无电流)。如果输入 X 置“1”(接通开关),则输出 A 就是“1”。

图 7.10~7.12 给出了采用 NOT 电路和 AND 电路以及 OR 电路的触点继电器和采用无触点继电器的电路。



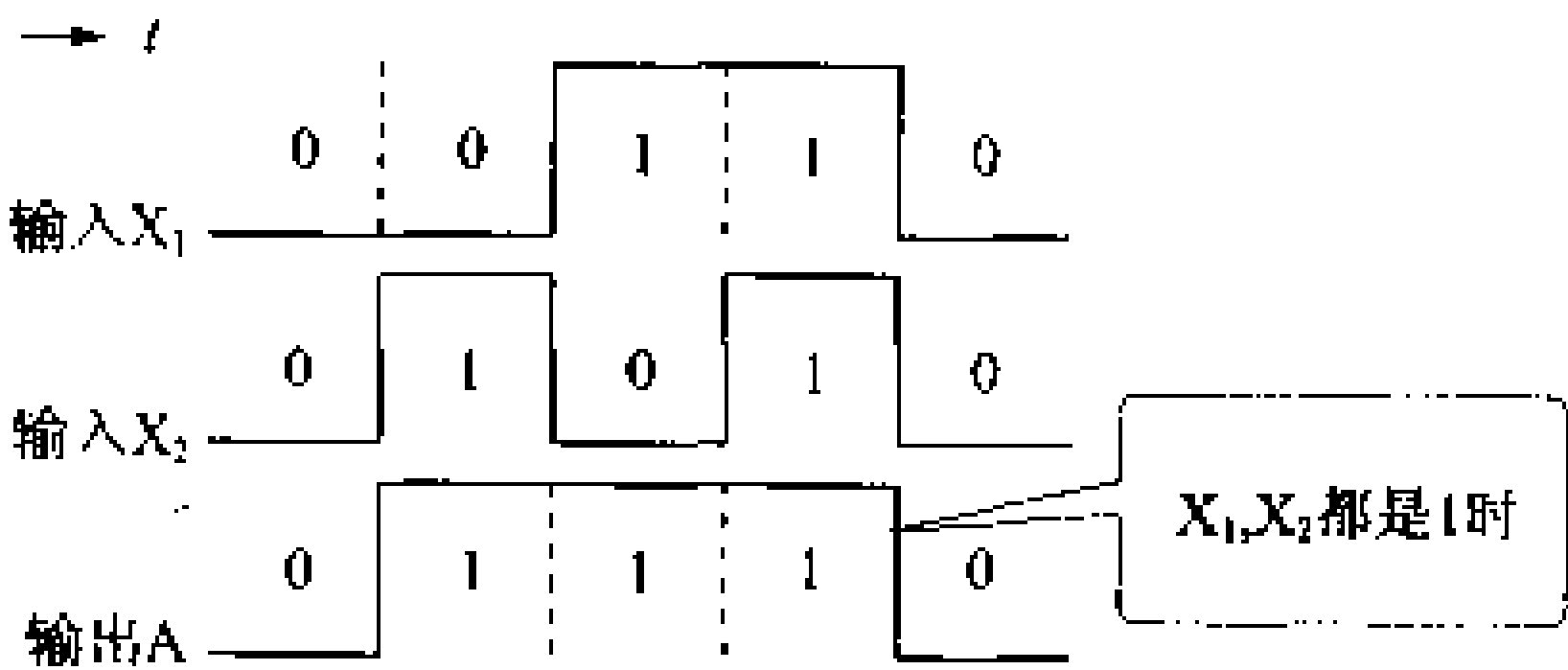
(a) 采用有触点的AND电路



(b) 采用无触点的OR电路

输入		输出
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	A
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

(c) 动作状态表



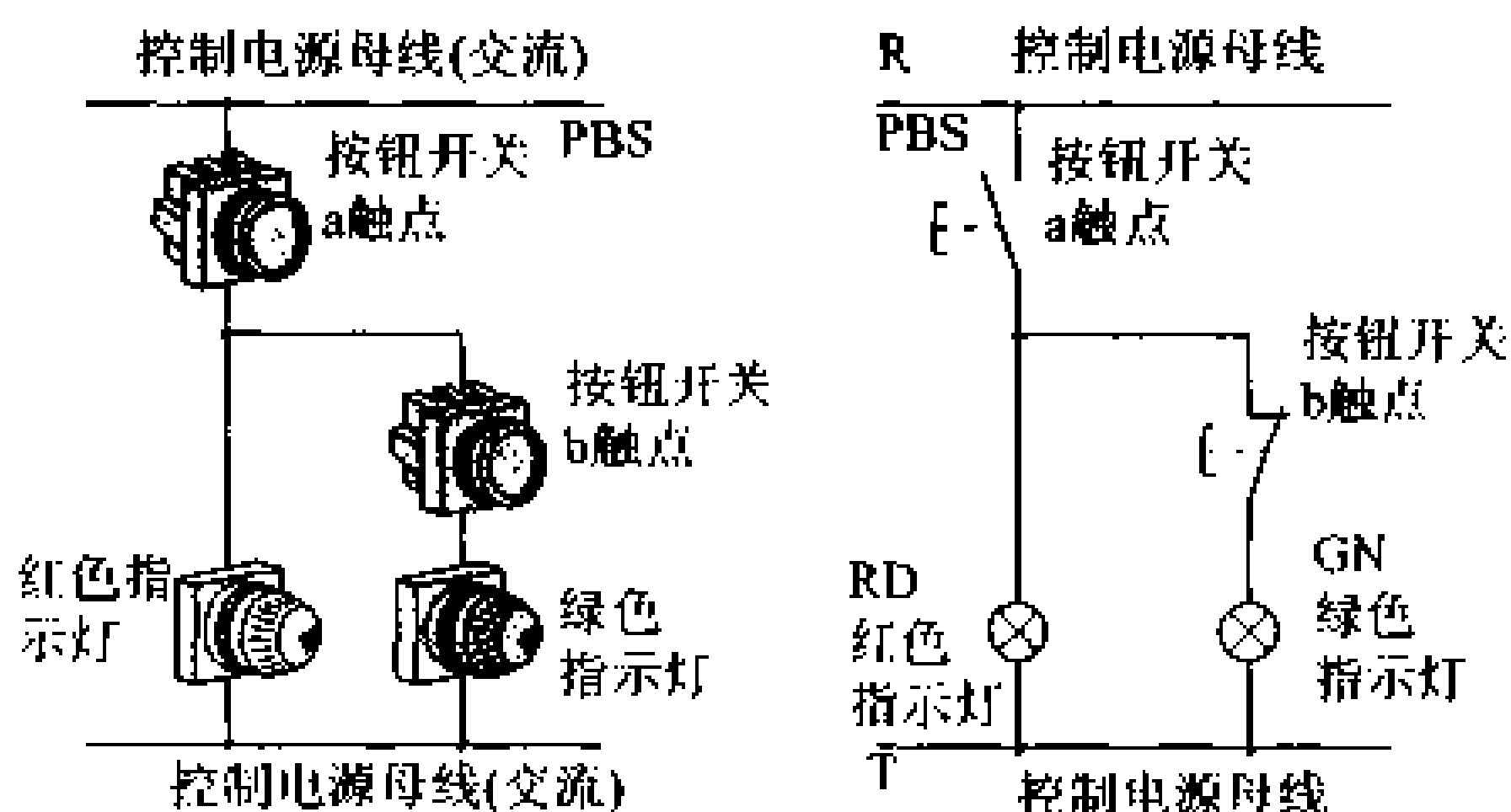
(d) 时间图

图 7.12 有触点和无触点继电器的顺序电路(其 3)

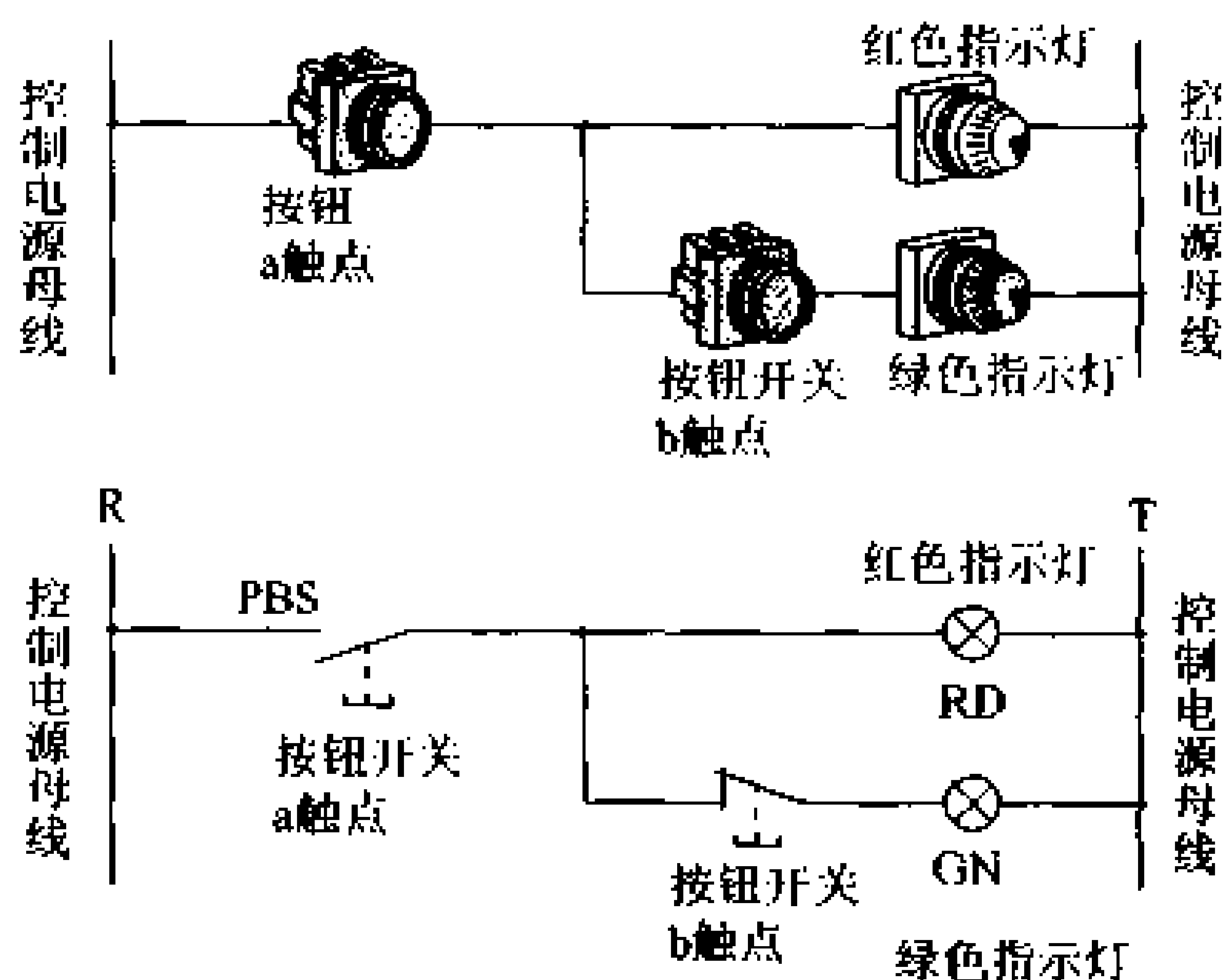
## 5 顺序图

### □ 要 点

顺序图是将一个复杂的控制电路的动作连接起来能让人很容易理解那样的图。电源连线有采取上下竖着画的和采取左右横着画的两种。将这时电源连线称作控制电源母线。交流时用 R、T (图 7.13) 符号表示, 直流时用 P、N (图 7.14) 符号表示。



(a) 竖着画的顺序控制图



(b) 横着画的顺序控制图

图 7.13 按钮开关的顺序图(7.5.1)

### □ 解 释

上面顺序图中的图形符号都是在所有机器和电路不工作(没有电流)状态下给出的。图 7.13 是使用交流电源母线控制按钮

开关(a 触点,b 触点)和控制红色指示灯与绿色指示灯的顺序图。  
图中:

- ① 表示按钮等手动操作的机器处在手还没有触到它们时的状态;
- ② 表示电磁继电器等处 在电源全部断开的状态;
- ③ 表示需要复位的机器处在复位的状态。

另外,该图竖画时,控制线是按动作次序从左向右画的,横画时,是从上向下画的。

用顺序图表示电磁继电器的图形符号时,尽管电源是接通的,但图形符号却是用电源断开的状态表示的。

图 7.14 是用直流的控制电源母线而画出的顺序图:按下开关 PBS 时,红色指示灯点亮;手放开时,蓝色指示灯点亮。

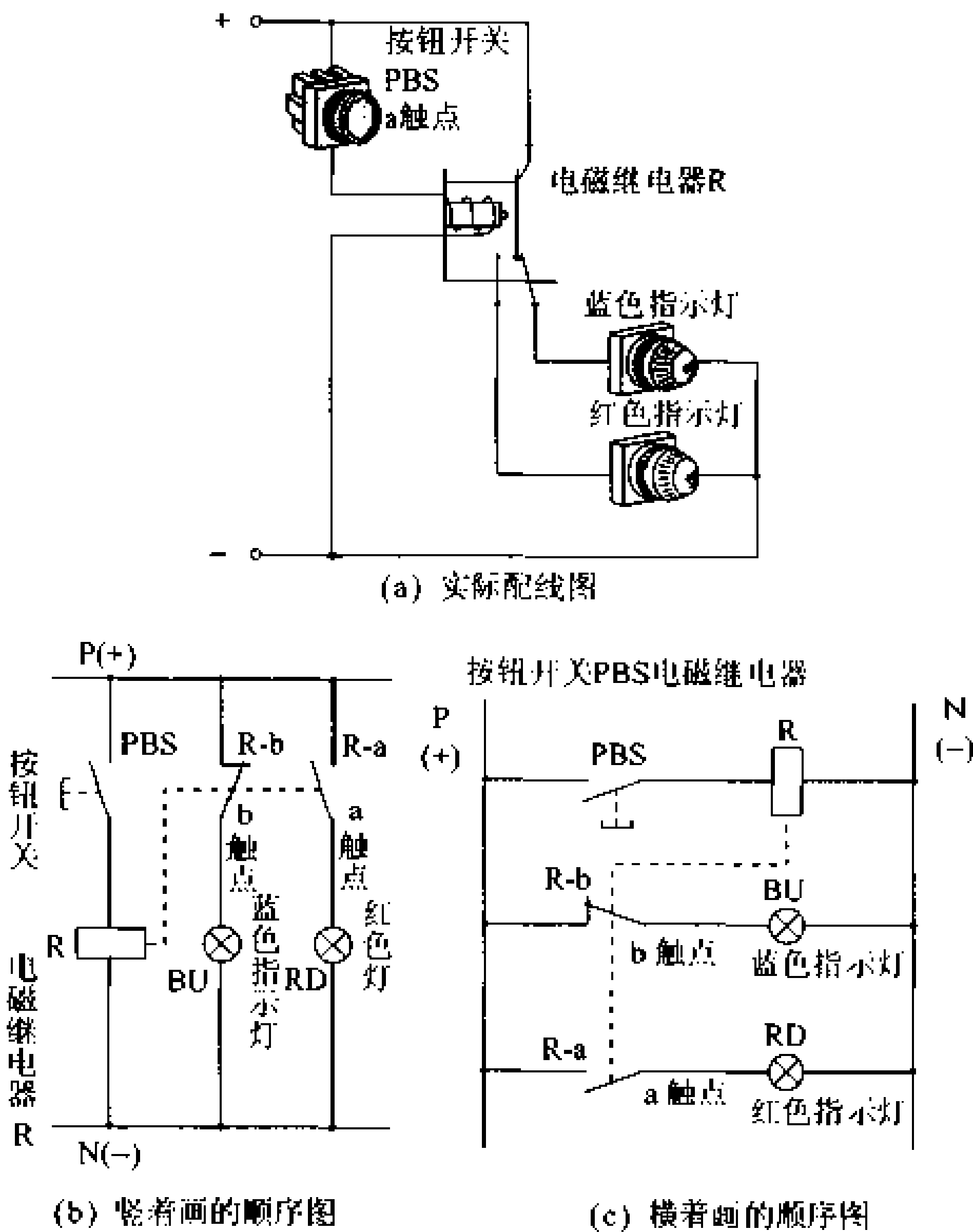
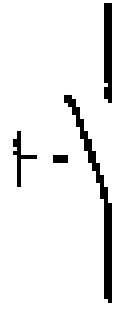



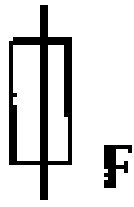
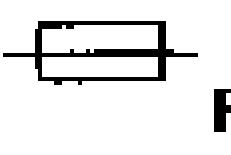
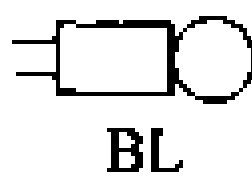
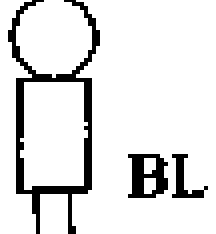
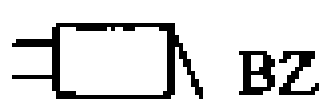
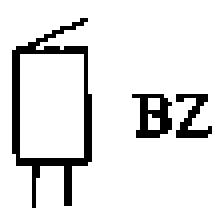
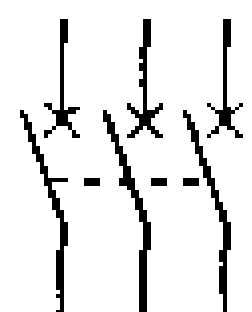
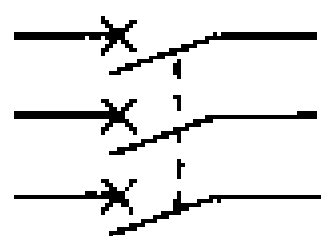
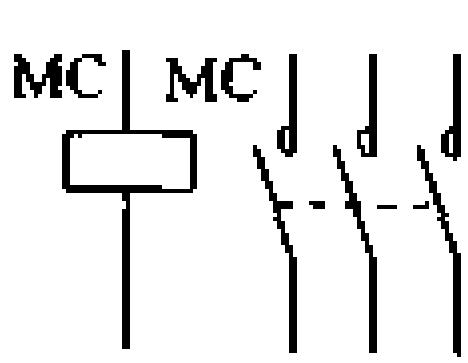
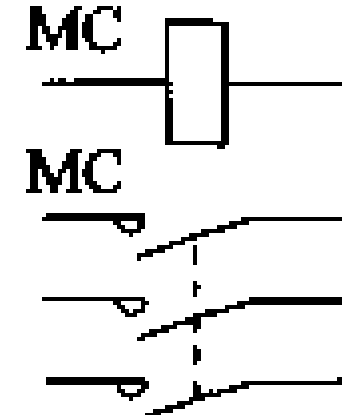


图 7.14 采用电磁继电器的顺序图

电磁继电器是用电磁线圈和触点部分表示。电磁线圈用符号 R、X、MC 表示,触点部分用的符号和电磁线圈符号相同。在其破折号(—)的后面写有 a 触点或 b 触点(例:R-a,X-a,MC-a 等)。

表 7.1 图形符号

种类	顺序图符号	
闸刀开关		
电动机	 直流	 交流
保险丝	 F	 F
电铃	 BL	 BL
蜂鸣器	 BZ	 BZ
配线用断路器		
电磁接触器	 MC	 MC

## □ 相关知识

另外,顺序图中还有除上述以外的如表 7.1 所示的一些图形符号。

# 6 各种传感器开关

**要 点** 在顺序控制中为了检测控制动作,使用了各种各样的传感器。其中有:像限位开关那样的用机械性接触检测的传感器,以及利用光、磁和超声波等以非接触形式进行检测的传感器等。

## **解 释** ● 限位开关

限位开关就是将各种各样形状的悬臂部件进行机械性接触来检测控制动作的开关(图 7.15)。一般情况下,它配备有 a 型触点和 b 型触点。

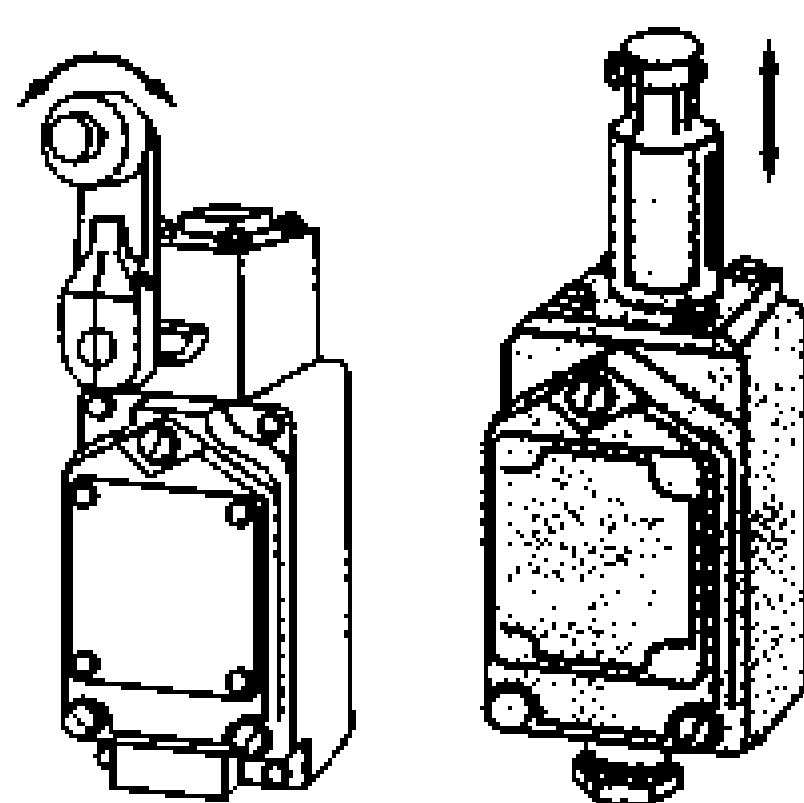


图 7.15 限位开关

## ● 光电开关

光电开关就是利用光来检测固体、液体和气体等的开关。它由投光器和受光器构成。投光器的光源使用白炽灯和红外线(LED)等。受光器有使用CBS和光电晶体管的,当光照射它们时

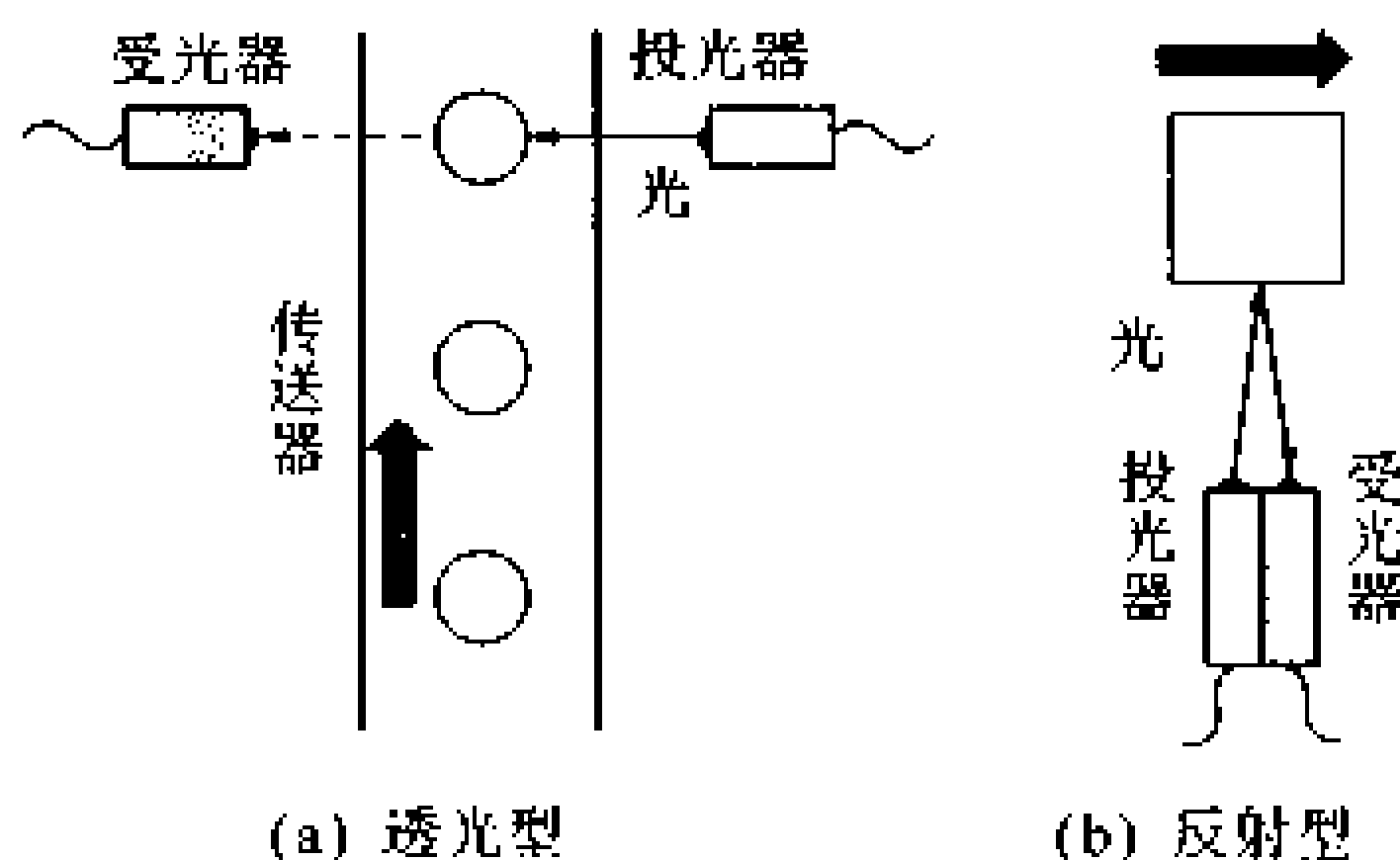


图 7.16 光电开关的配置



就发出检测信号。另外,根据投光器和受光器的配置,又分为透光型和反射型两类。透光型的是将投光器和受光器分别设置,物体在其期间通过时,一遮住光线就发出检测信号。反射型的是把投光器和受光器作为一体来配置,从被检测物体反射光来检测信号的。图 7.16 给出了光电开关的配置。

### ● 感应式开关

感应式开关是当被检测的物体接近到某一距离时,就发出检测信号的开关。它有高频振荡型、感应电桥型(差动变压器)和衔铁型以及静电电容型等。

#### 高频振荡型

① 高频振荡型 利用高频振荡电路的振荡线圈阻抗随金属等物体接近距离的变化而变化来达到停止振荡的原理。

#### 感应电桥型 (差动变压器)

② 感应电桥型(差动变压器) 利用电桥电路的一个边的阻抗的变化使电桥失去平衡的原理。

#### 衔铁型

③ 衔铁型 把磁铁安装在物体上,用其吸引力来驱动开关。

#### 静电电容型

④ 静电电容型 利用电极间插入物质的介电常数的不同而使静电容量发生变化的原理。它适用于检测液面。

### ● 超声波开关

利用发出超声波的扬声器和接收超波的麦克风来检测物体的开关,通常用于自动门等,也用于粉状物体的检测。

### ● 温度开关

温度开关用于需要保持一定温度的装置里,有热敏电阻和热电偶等。通常,先给出设定温度,然后再测量温度。当测到的温度偏离设定温度值时就动作。并根据开关的动作来进行加热或冷却。温度在  $200^{\circ}\text{C}$  以下时使用热敏电阻;在  $200^{\circ}\text{C}$  以上时使用热电偶。

### ● 压力开关

压力开关是用膜片等来检测它随压力而变形的开关,它有使用微型开关进行通断的机械式和用半导体的压力传感器式两种。后者是把物体随压力的变形转换成电压。因为半导体式的是无触点式的,所以它在寿命和可靠性以及小型化等方面都比机械式的优越。

# 7 顺序控制器

□ 要 点

顺序控制器也称为可编程控制器(PC)。它是用计算机控制其内部的无触点继电器、定时器和计数器来让顺序电路工作的控制器。

□ 解 释

● 顺序控制器

顺序控制器由存储器、运算控制器、输入输出转换器以及输入输出部分构成。

存储部分存储动作次序的程序。运算控制器是对存入的各种运算和对外部设备发出动作指令的部分。输出输入转换部分是处在运算控制部分和输出输入部分之间的部分。输入部分读入来自按钮开关和继电器触点等的输入信号;输出部分则对指示灯和电动机等发去动作信号。

其特征是,首先,它能快速而简单地变更控制顺序。如果是采用电磁继电器等的顺序电路,那么,即便是少许的控制变更,也需要配线和电磁继电器的连接变更。可是采用顺序控制器,只需将对应部分的程序变更一下即可。其次,因为没有电磁继电器等可动部分,所以,耐震性好。又因为内部的触点采用无触点继电器,所以,没有触点耗损,从而寿命长。再者,能将大规模的顺序控制作到设备小型化,而且还可将工作结果的数据存储其内部或发送出去。图 7.17 给出了顺序控制器的结构。

存储部分  
运算控制器  
输出输入转  
换部分  
输入部分  
输出部分

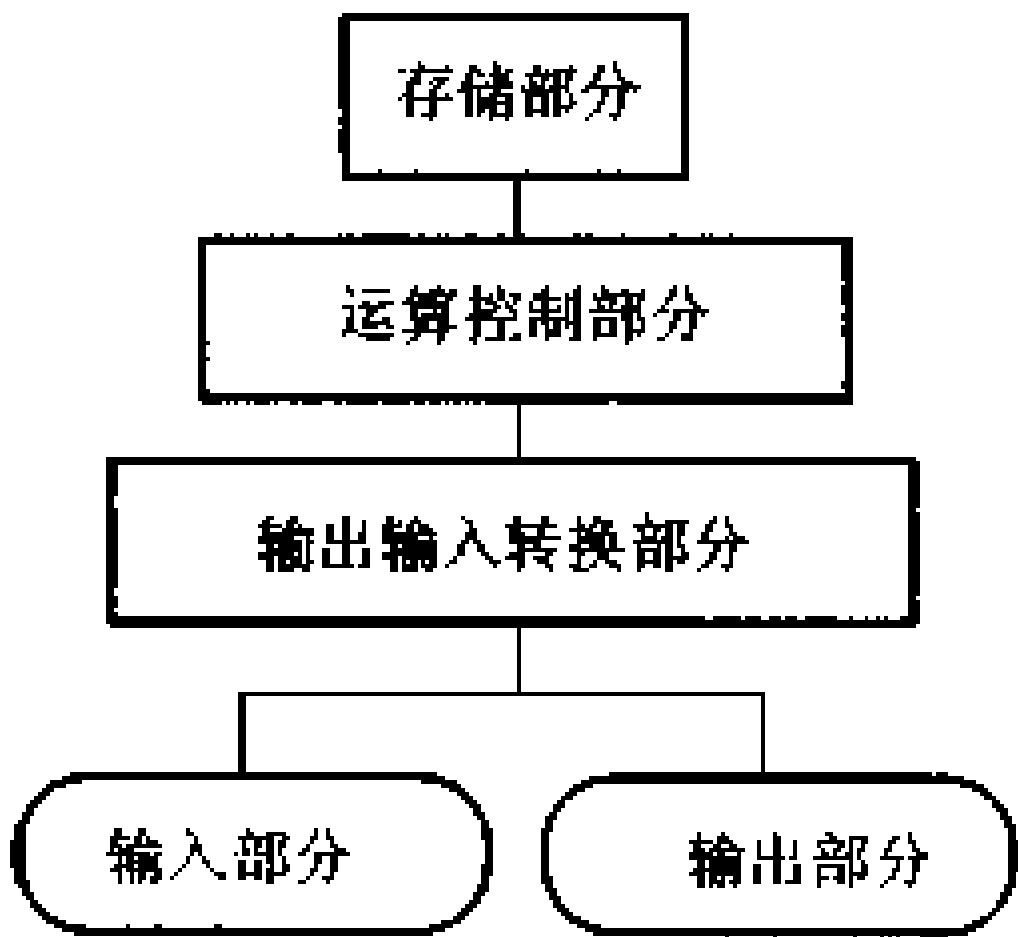


图 7.17 顺序控制器的结构

## ● 顺序控制器的程序

梯形图

顺序控制器的程序,一般用梯形图绘出。另外,也有用编程器的输入机,从写有梯形图形符号的键盘进行输入。表 7.2 给出了梯形图形符号。

表 7.2 梯形图形符号

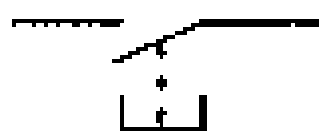
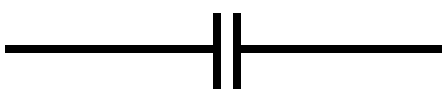
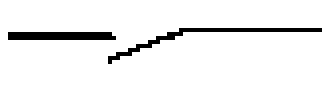
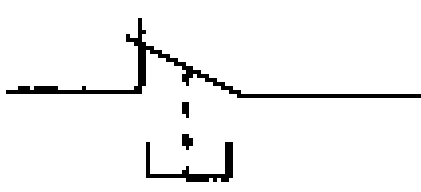


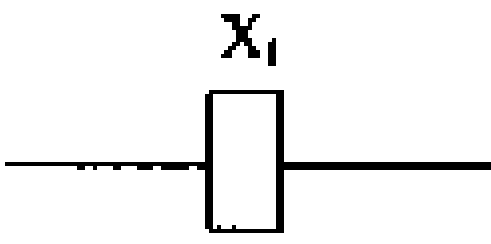
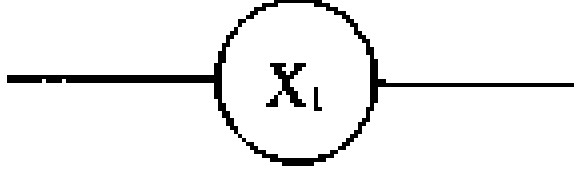
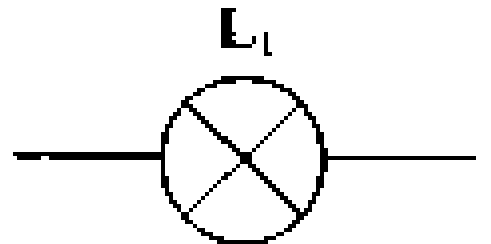
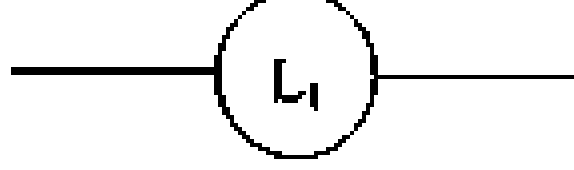
	种 类	顺序的图符号	梯形的图符号
a 触点	按钮开关		
	继电器		
b 触点	按钮开关		
	继电器		
负载	继电器的线圈 (例: $X_1$ )		
	指示灯 (例: $L_1$ )		

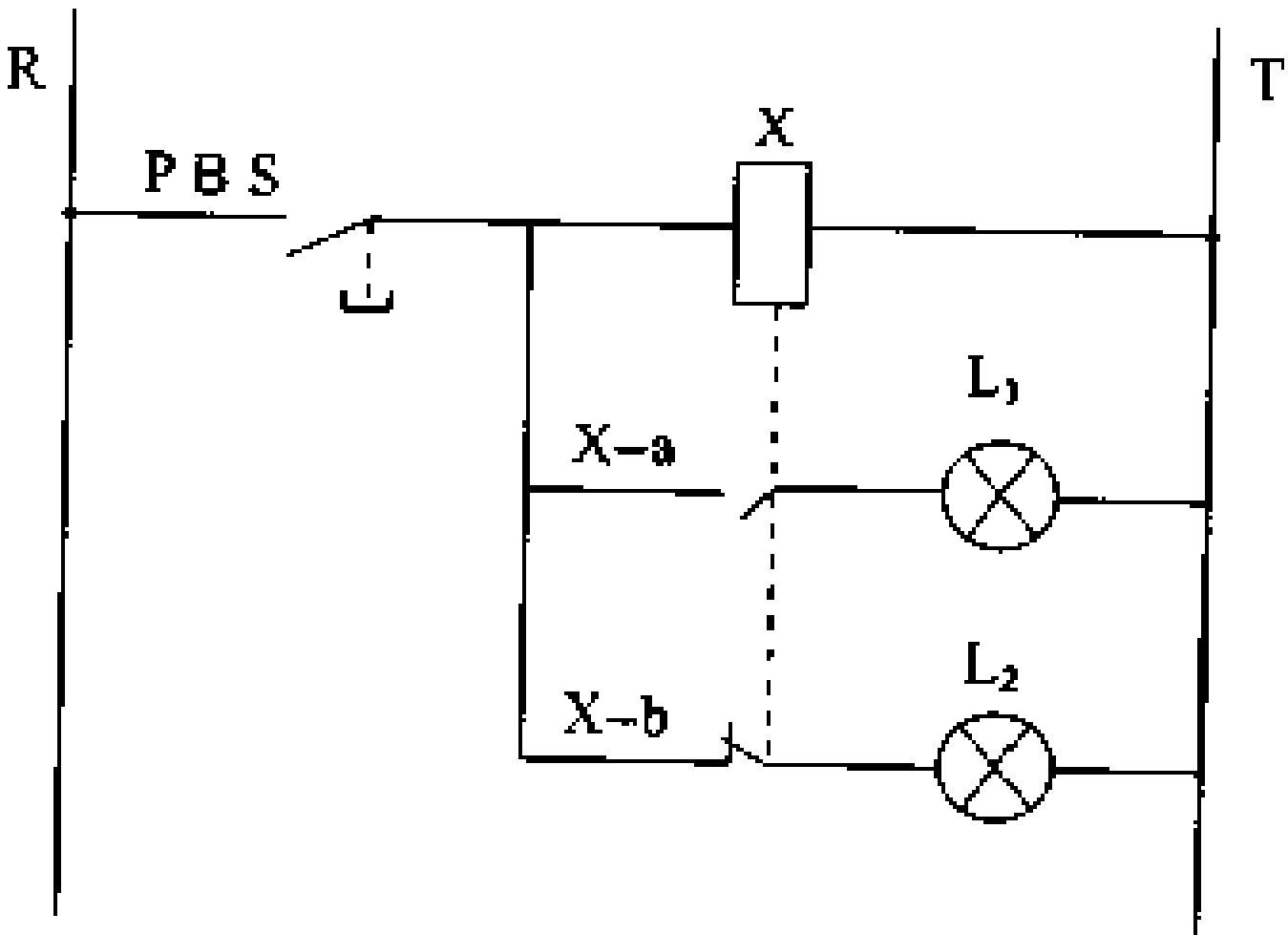
图 7.18 给出了简单顺序控制的顺序图和梯形图。

按下按钮开关 PBS 让电磁继电器 X 动作,指示灯  $L_1$  点亮,再利用 b 型触点让指示灯  $L_2$  熄灭。

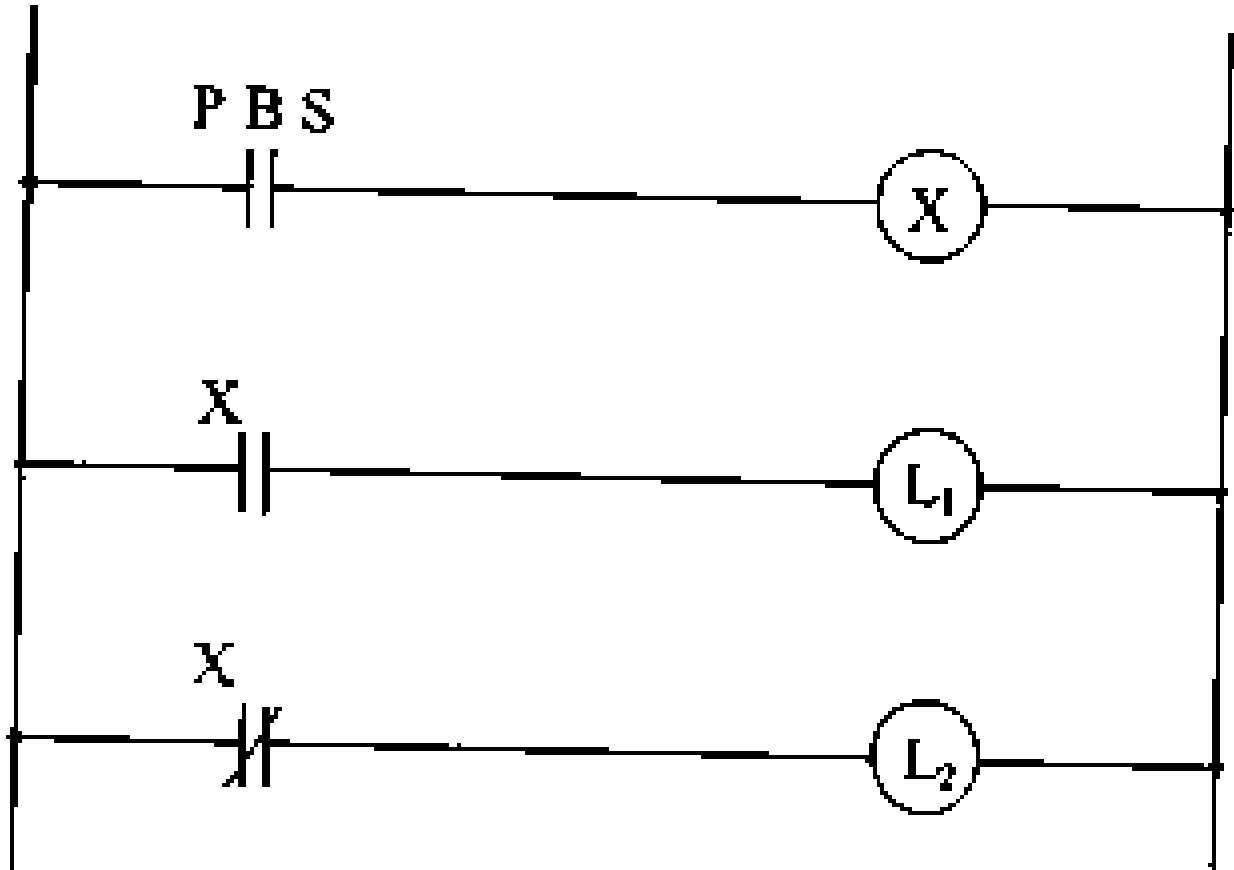
加载 非加载  
输出

梯形图上,把 a 型触点叫作加载(LD)、把 b 型触点叫作非加载(LD NOT),把电磁继电器的线圈和指示灯等负载叫输出(OUT)。另外,触点进行串联连接时,是用编程控制输入机的“与”、(逻辑乘法:AND)键进行输入。并联连接时,是用“或”(OR)键进行输入。图 7.19 是表示梯形图形符号的用法。

与 或



(a) 顺序图



(b) 梯形图

图 7.18 顺序图和梯形图

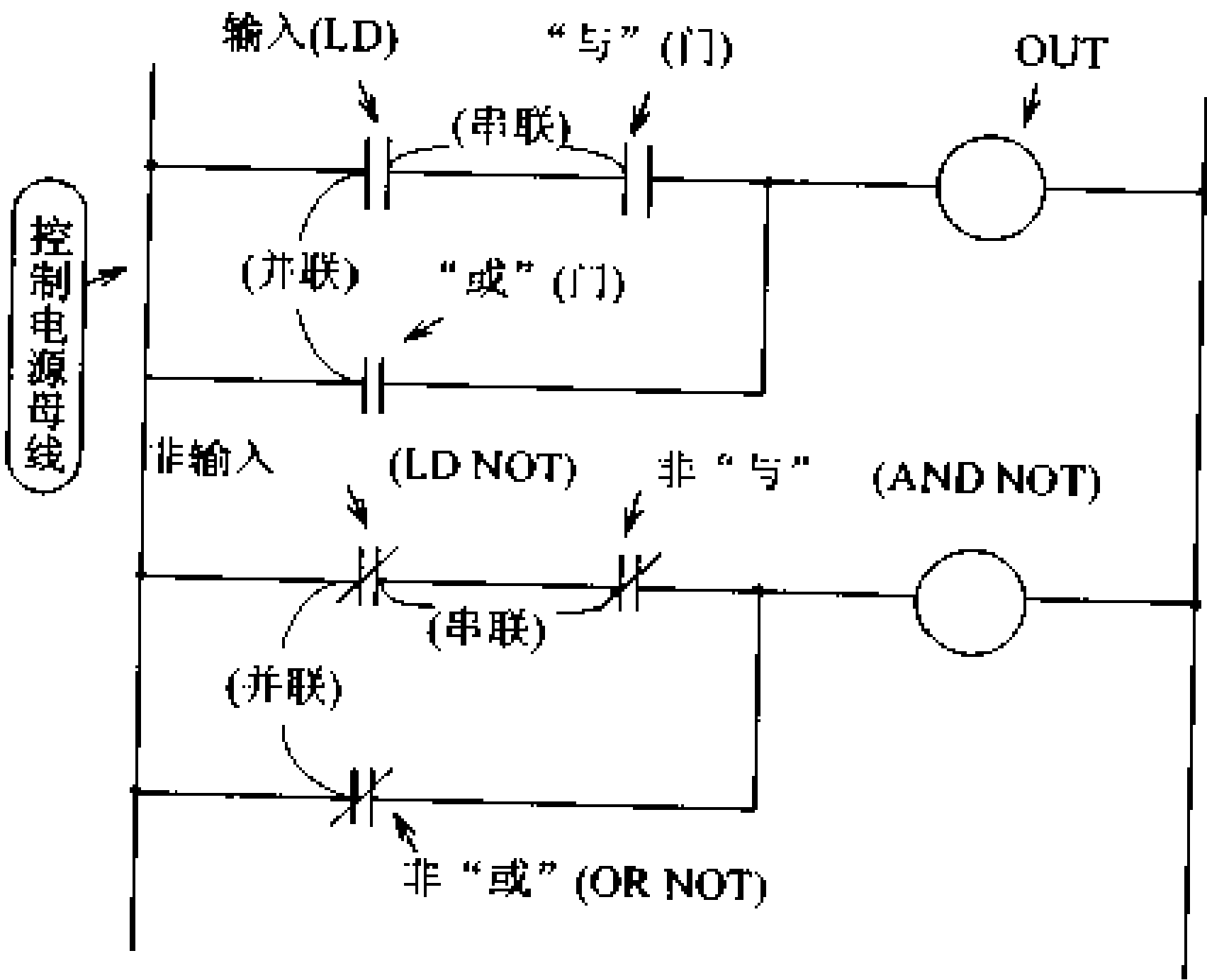


图 7.19 梯形图形符号用法

## 8 自保电路

### □ 要 点

能把输入电磁继电器的信号保持在继电器内部,也就是说,即使切断输入信号也能继续保持原来状态的电路叫作自保电路。

自保电路中有存储功能,即使放开按钮开关也和一直按下时一样。

### □ 解 释 ● 自保电路的动作

图 7.20 给出了自保电路,图 7.21 给出了它的时间图。

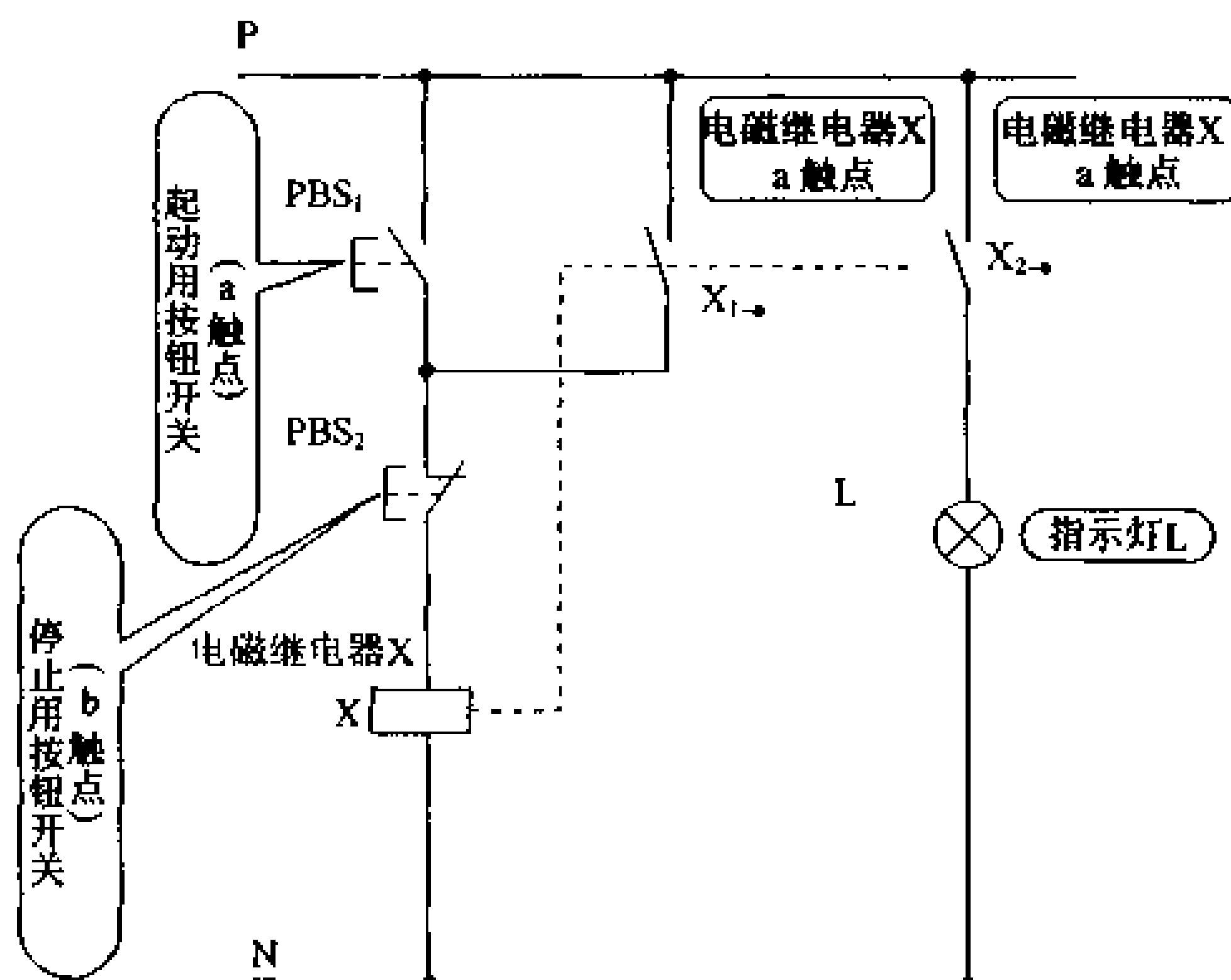


图 7.20 自保电路

图 7.20 是一按下动作按钮开关  $PBS_1$ , 指示灯  $L$  一直点亮, 按下复位按钮开关  $PBS_2$ , 自保电路就被解除。

#### ● 加入自保的操作顺序

- ① 按下动作按钮开关  $PBS_1$ ;
- ② 接通电磁继电器  $X$  的线圈;
- ③ 电磁继电器  $X$  动作;
- ④ 触点  $X_1$  闭合;
- ⑤ 不管动作按钮开关  $PBS_1$  的  $a$  型触点状态如何, 电磁继电器

器 X 的线圈继续接通,电磁继电器 X 保持工作,与触点  $X_2$  相连接的指示灯一直发光。

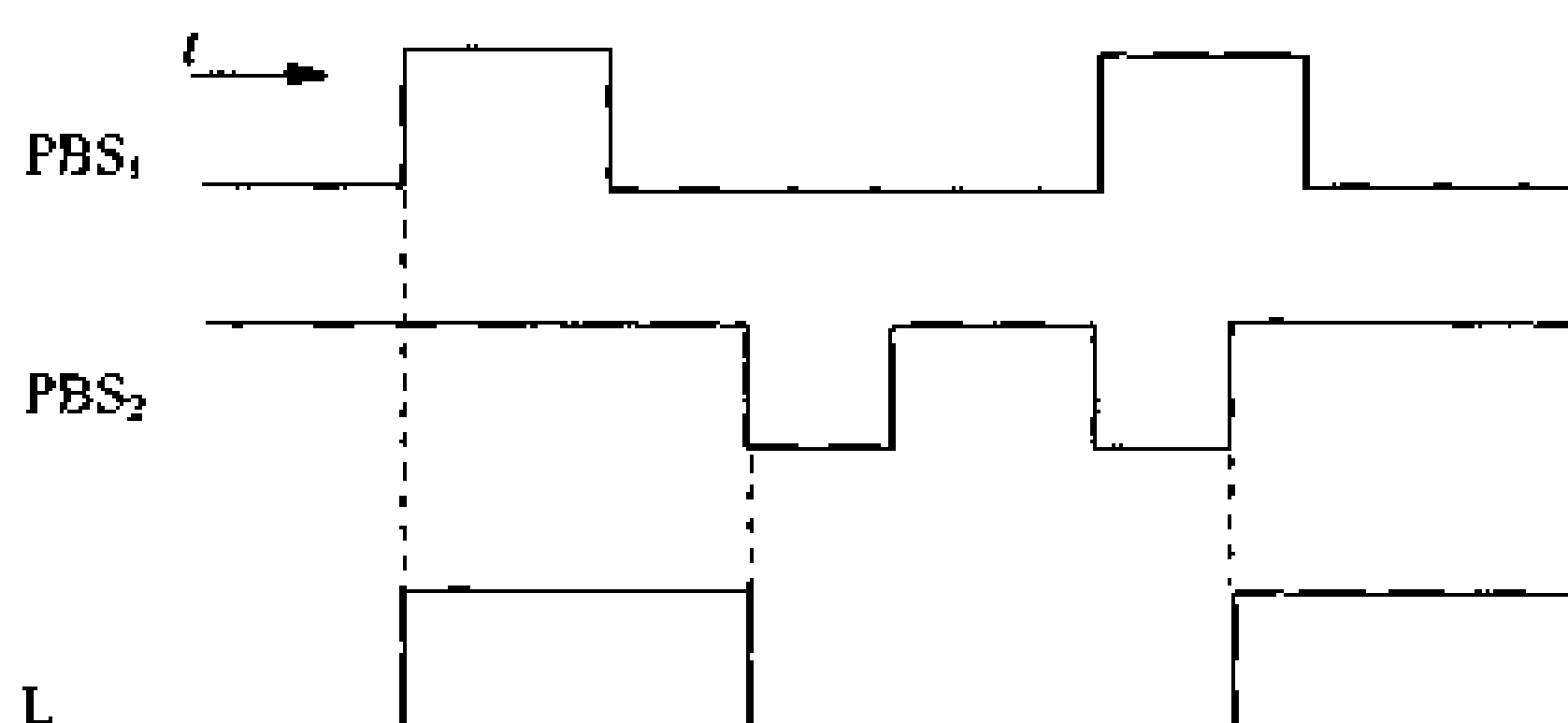


图 7.21 时间图

### ● 解除自保的操作顺序

- ① 按下复位按钮开关  $PBS_2$ ;
- ② b 型触点被打开,断开电磁继电器 X 的线圈;
- ③ 电磁继电器复位;
- ④ 触点  $X_1$  和触点  $X_2$  打开,指示灯 L 熄灭。

图 7.20 中是同时按下  $PBS_1$  和  $PBS_2$  的情况,这时,电磁继电器的线圈里无电流。因此,电磁继电器 X 不动作,自保也没有加入,指示灯 L 没有点亮。称这样工作的电路为复位优先的自保电路。

图 7.22 给出了同时按下  $PBS_1$  和  $PBS_2$  时,自保没有加入和指示灯点亮的电路。

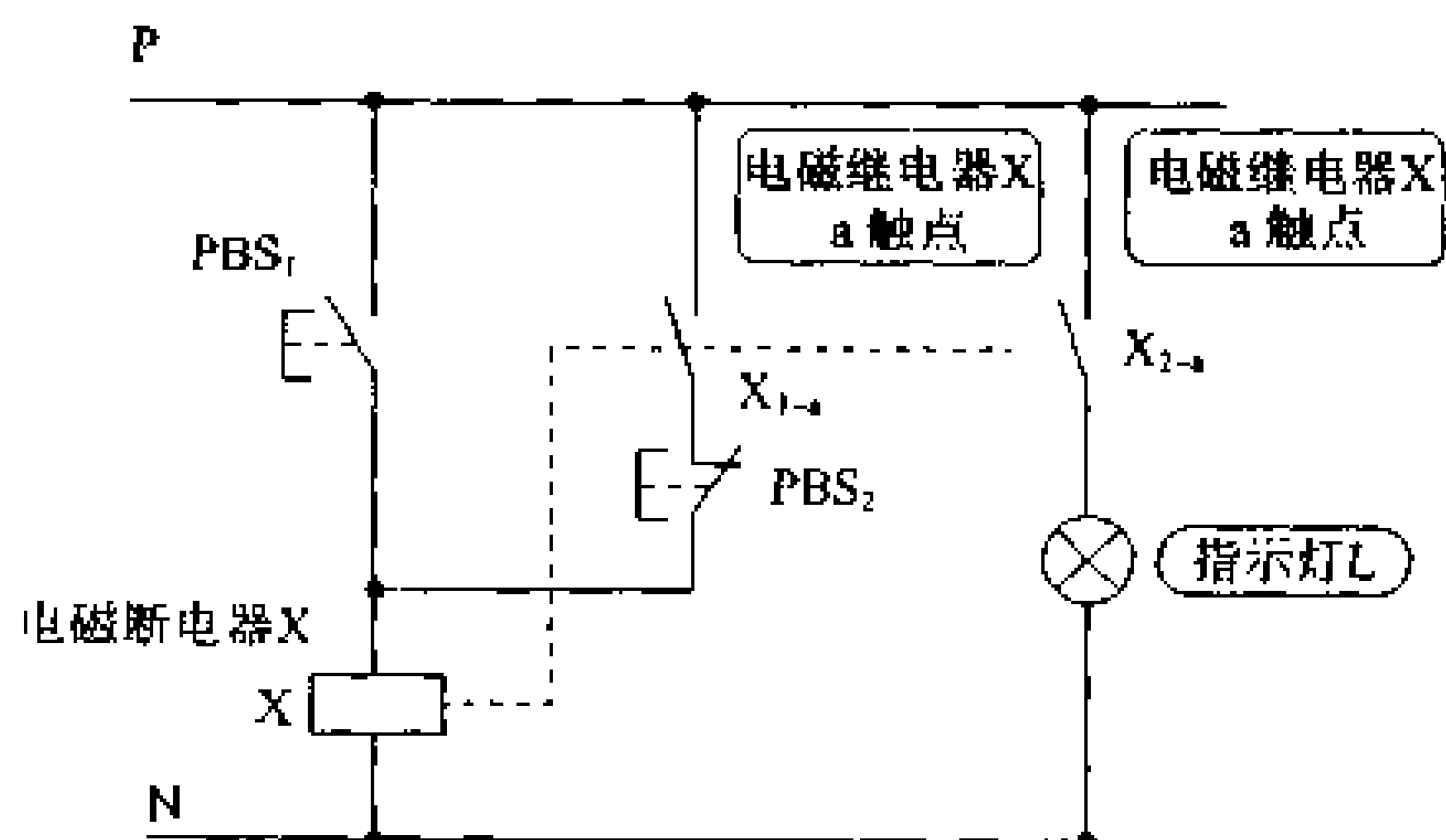


图 7.22 动作优先的自保电路

## 9 联锁电路

### □ 要点

联锁电路也叫禁止电路。它是在条件没有全部具备之前,一直进行抑制动作的电路。主要是为了机器保护、操作人员安全和设置动作优先而使用的电路。

### □ 解释 ● 联锁电路

图 7.23 中,当按下开关  $PBS_1$  时,因为电磁电器  $X_1$  动作,  $X_{1-1}$  闭合,所以,指示灯点亮。在这种状态下,按下开关  $PBS_2$ ,因为  $X_{1-1}$  也开着,所以,电磁继电器  $X_2$  复位,  $X_{1-1}$  闭合,  $X_1$  打开,所以,指示灯  $L_1$  熄灭。

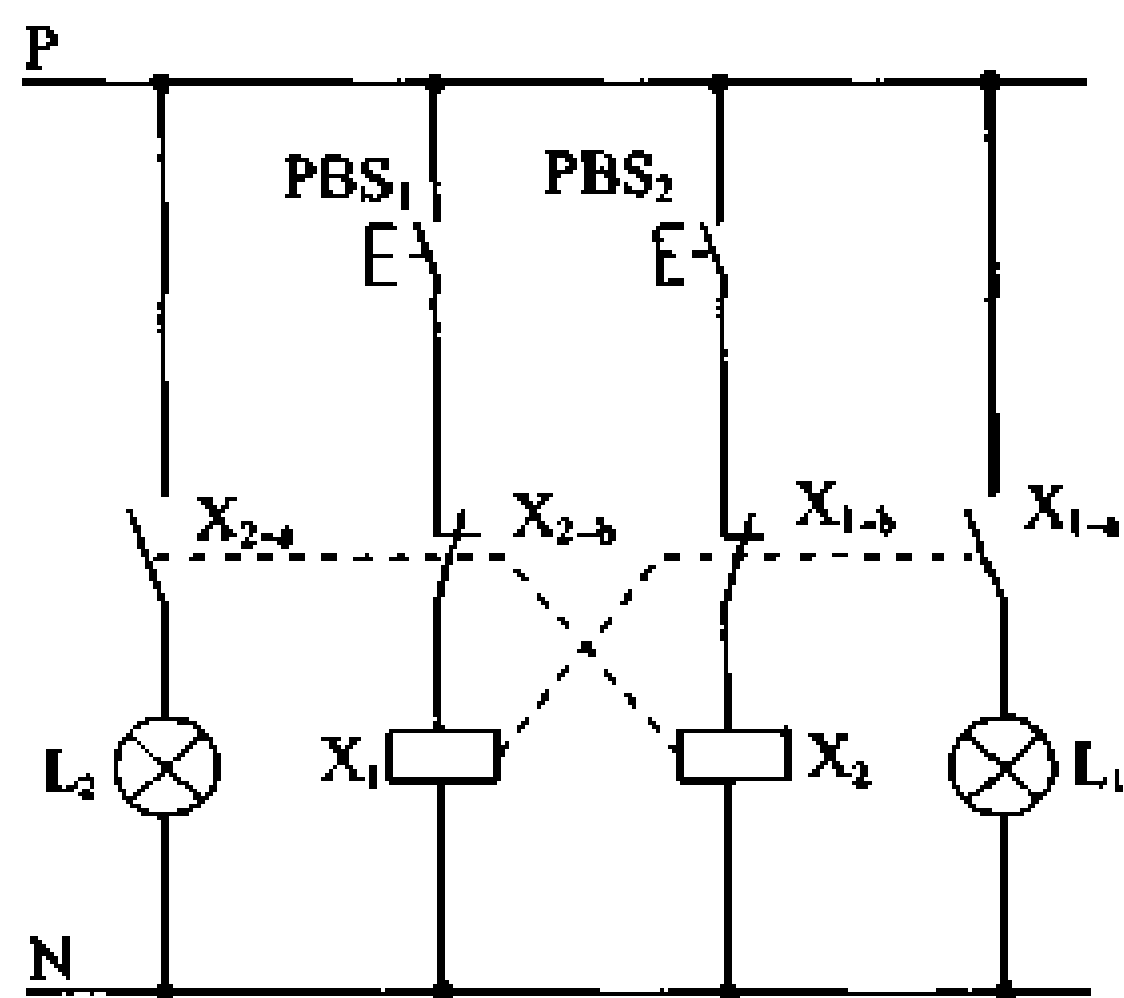


图 7.23 联锁电路

按下开关  $PBS_2$ , 电磁继电器  $X_2$  动作, 指示灯  $L_2$  点亮。和按下开关  $PBS_1$  时一样, 因为联锁电路工作, 所以, 指示灯  $L_1$  和  $L_2$  不能同时点亮。图 7.24 是把这些动作表示在时间图上的图。

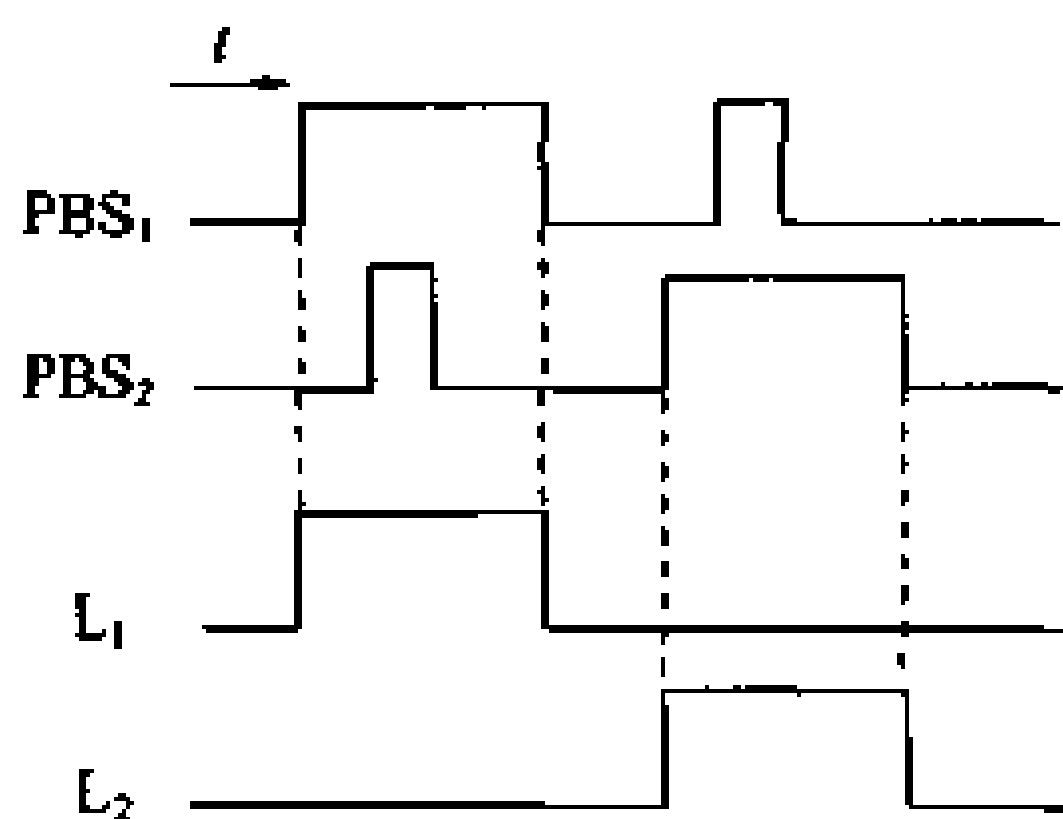


图 7.24 时间图

## ● 电动机正、反转控制

图 7.25 是电动机的正反转的控制。它是用电磁接触器实现电动机正、反转控制的。

配线用断路器 MCCB 是在电路过电流和短路时,断开电路的保护装置。它使断开超过电磁继电器的大电流成为可能,而且是主触点和辅助触点联锁动作。

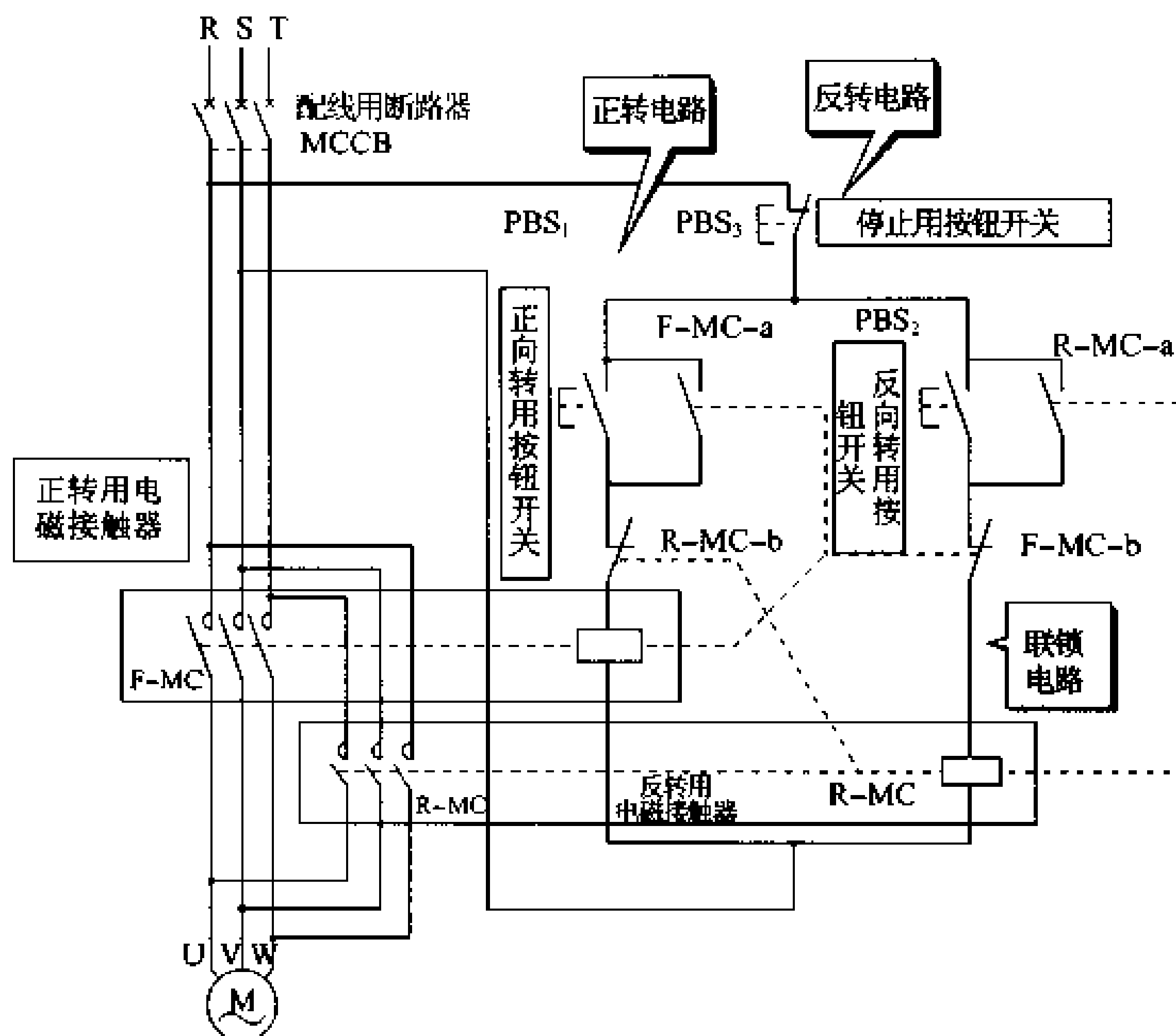


图 7.25 电动机的正反转电路

配线用断路器合闸之后,按下正旋转开关  $PBS_1$ ,正旋转用电磁接触器 F-MC 的主触点合上,电动机进行正转动。与此同时,辅助触点的 F-MC-a 合上之后,加入了正旋转开关的自保。在辅助触点的 F-MC-b 打开之后,加入反旋转电路的联锁。然后再按下停止按钮开关  $PBS_3$ ,两电磁接触器复位,电动机停止。

如果没有联锁电路,两电磁接触器同时动作,R 相和 T 相就短路,这时会流有很大的短路电流造成烧损事故。



### ● 热继电器

热继电器(THR)又叫热动式过流继电器。是保护电路异常时电流过大的设备。热继电器的工作原理是:由于电路异常时电流过大而发热,使两种金属受热变形不同,而驱动电磁继电器的 B 触点进行工作,从而让异常状态的电路断开。热继电器内装有热继电器开始动作到它进行复位动作之前一直维持着断开电路的机构。复位动作是在除去异常原因之后,再用手动进行操作。起动动作的电流值是用标度盘来设定。

# 10 定时器电路

## □ 要点

定时器也叫限时继电器。是一种具有能在经过了预先设定的时间之后打开或关闭电路触点的继电器。其动作有从输入信号开始到经过一定时间之后,输出触点开始动作的限时动作和从切断信号开始到经过一定时间之后,输出触点开始动作的限时复位两种。限时动作时,输入信号一在中途切断,输出端复位。限时复位时,信号再次输入时,输出端就复位。

## □ 解释

### ● 电动机式定时器

电动机式定时器,是用输入信号来使小型同步电动机转动的,经过机械设定时间后,触点就进行关、开的定时器。

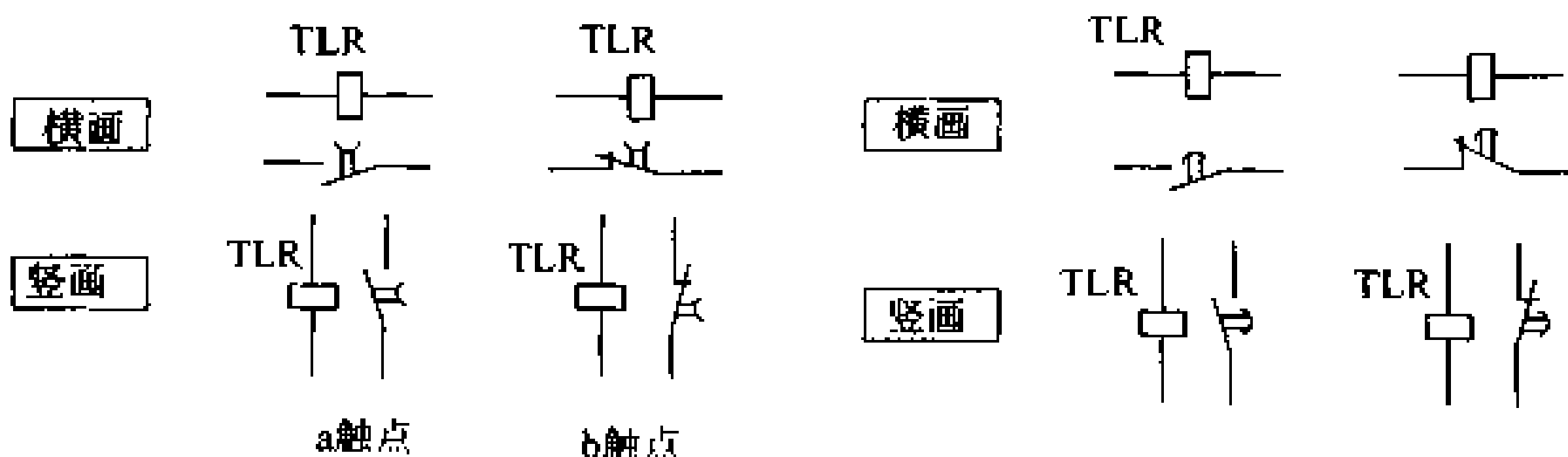
### ● 电子式定时器

电子式定时器的原理,是用电容器和电阻器的组合,再利用对其充放电特性来形成时间迟延,而进行触点关、开的定时器。

### ● 制动式定时器

制动式定时器是利用电磁线圈中的空气和油等的制动力,产生与输入信号的时间迟延来关、开触点的定时器。

限时动作时,图形符号如图 7.26(a)所示。限时复位时,图形符号是图 7.26(b)。图 7.27 是定时器的时间图。



(a) 限时动作定时器的图形符号

(b) 限时复位定时器的图形符号

图 7.26 定时器的图形符号

**控制例 1** 图 7.28 是采用定时器(TLR)限时动作指示灯点亮与熄灭的电路,红灯不亮,绿灯亮。如果将开关 PBS 持续按下 30s 钟,红灯亮,绿灯熄灭。

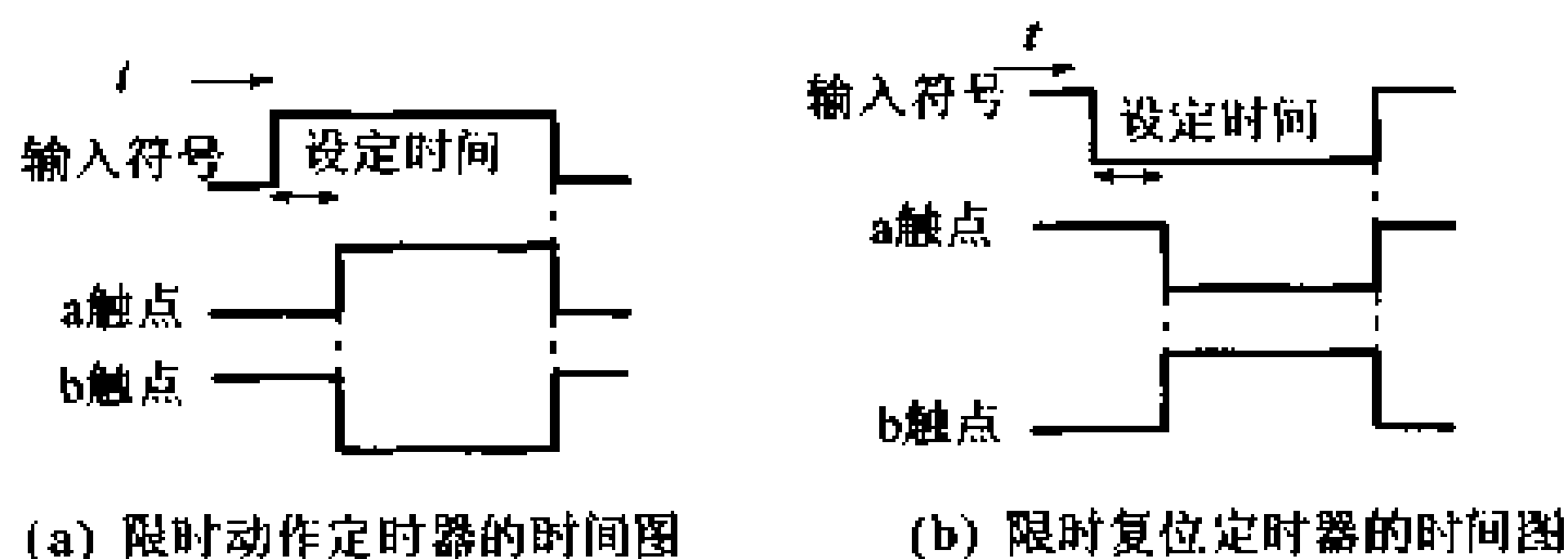


图 7.27 定时器的时间图

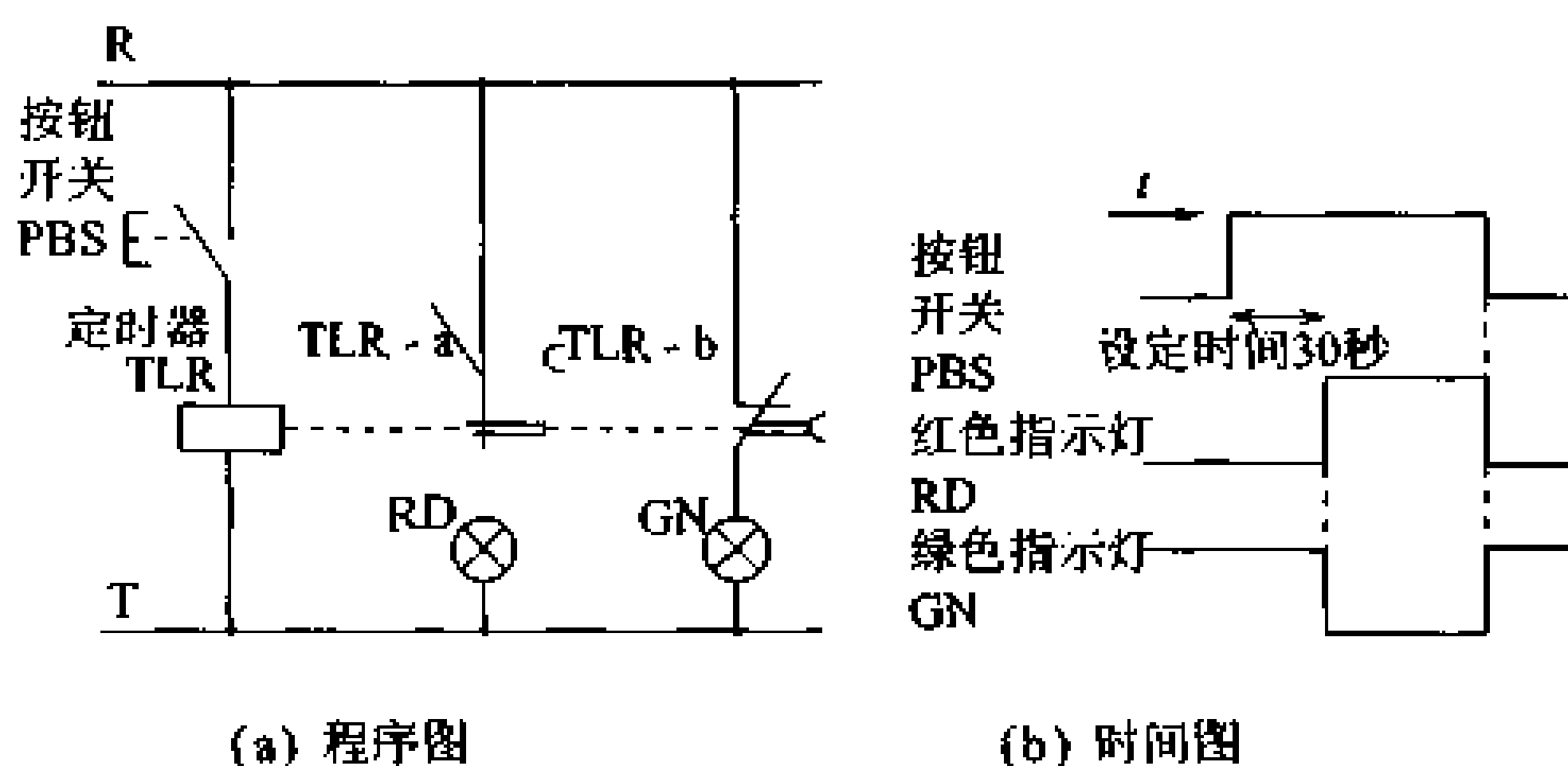


图 7.28 采用定时器限时动作的指示灯亮灭电路

**控制例 2** 图 7.29 是使用定时器限时复位的铃与蜂鸣器鸣响的电路。现在来看一下汽车从车库一辆挨着一辆出库的控制, 车出库准备好了, 蓝色指示灯亮。如果按一次开关 PBS, 蓝色指示灯熄灭, 铃声响, 告知人们车可以出车库了。手离开开关 30s 钟后, 铃声停止鸣响, 告知人们下一辆车可以出库的蓝色指示灯再次点亮。

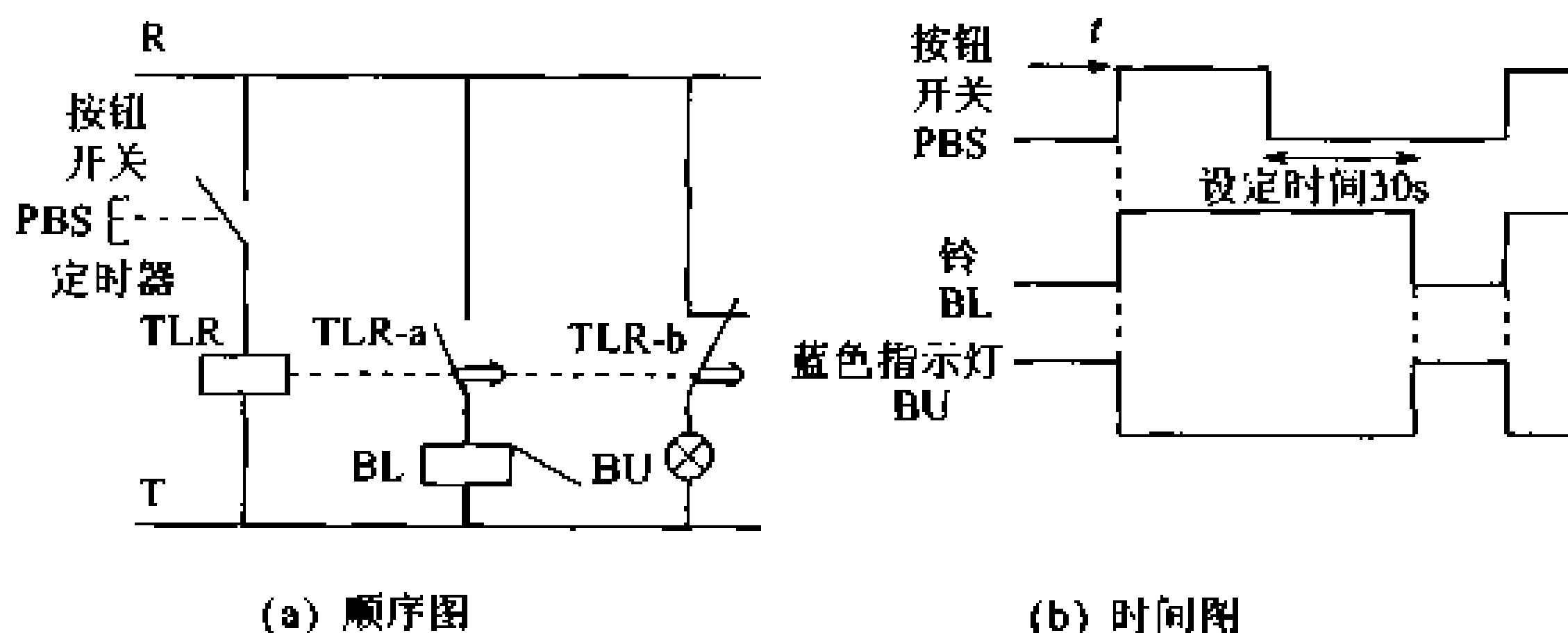


图 7.29 采用定时器限时复位的铃与蜂鸣器鸣响电路

# 11 顺序控制

**要 点** 建设一个一层楼为烹饪间，二层楼为餐厅的西式餐馆，需要安装一个为其运送菜饭的小型升降机。下面以这样的运送饭菜小型升降机为例来说明这一顺序控制过程。

**解 释** ● 运送饭菜用的小型升降机的控制

为了让运送饭菜用小型升降机安全运行，需要做如下一些工作。图 7.30 给出了运送菜饭用小型升降机的原理图。

- ① 按下开关  $PBS_1$ ，升降机上升；
- ② 按下开关  $PBS_2$ ，升降机下降；
- ③ 用限位开关  $LS_1$  检测升降机是否已达到一层；
- ④ 用限位开关  $LS_2$  检测升降机是否已到达二层；
- ⑤ 用指示器灯  $L_1$  和  $L_2$  告知升降机是处在一层还是二层；
- ⑥ 用三相电动机  $M$  的正、反转来控制升降机的上升与下降；

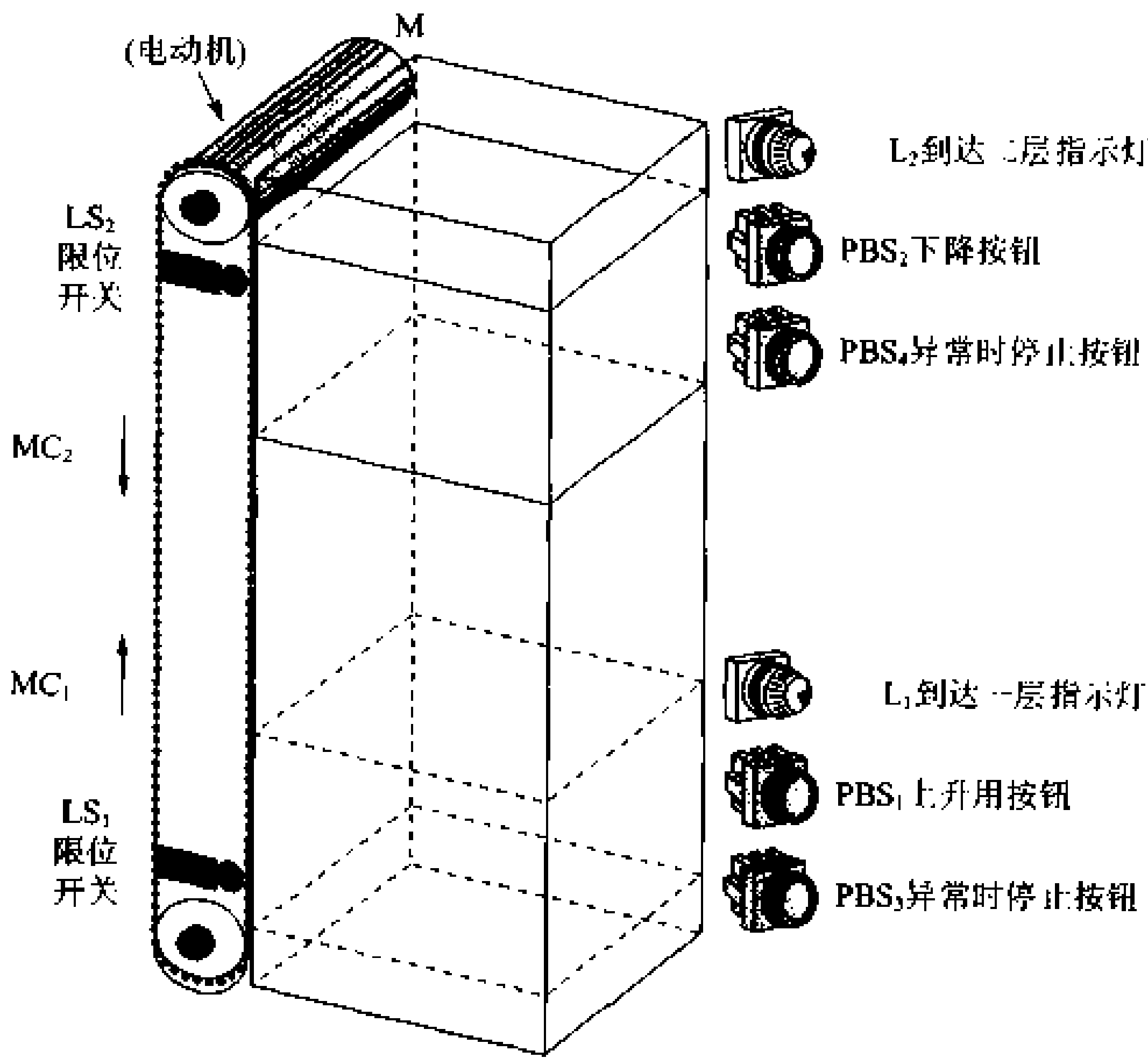


图 7.30 运送饭菜用的小型升降机

- ⑦ 用正、反转电磁接触器  $MC_1$  和  $MC_2$  开关电动机的电路；
- ⑧ 用配线用断路器 MCCB 来保护电动机的配线；
- ⑨ 异常时,用开关  $PBS_3$  和  $PBS_4$  让升降机停止运转。

升降机设有上升与下降开关,其中一个一旦被按下,即使手离开开关,自保电路和联锁电路也能使其继续工作。电动机起动用全电压起动,电动机反转是用 R 相和 S 相转换来实现。图 7.31 给出了运送饭菜用小型升降机的顺序图。

按下上升开关,上升用的电磁接触器动作,触点  $MC_{1-1}$  被自保,电动机 M 正转动,升降机上升。这时触点  $MC_{1-6}$  起着下降开关  $PBS_2$  的联锁作用。因为升降机升到二层的停止位置时,按下限位开关  $LS_2$ ,触点  $LS_{2-6}$  打开,上升用的电磁接触器  $MC_1$  复位,升降机

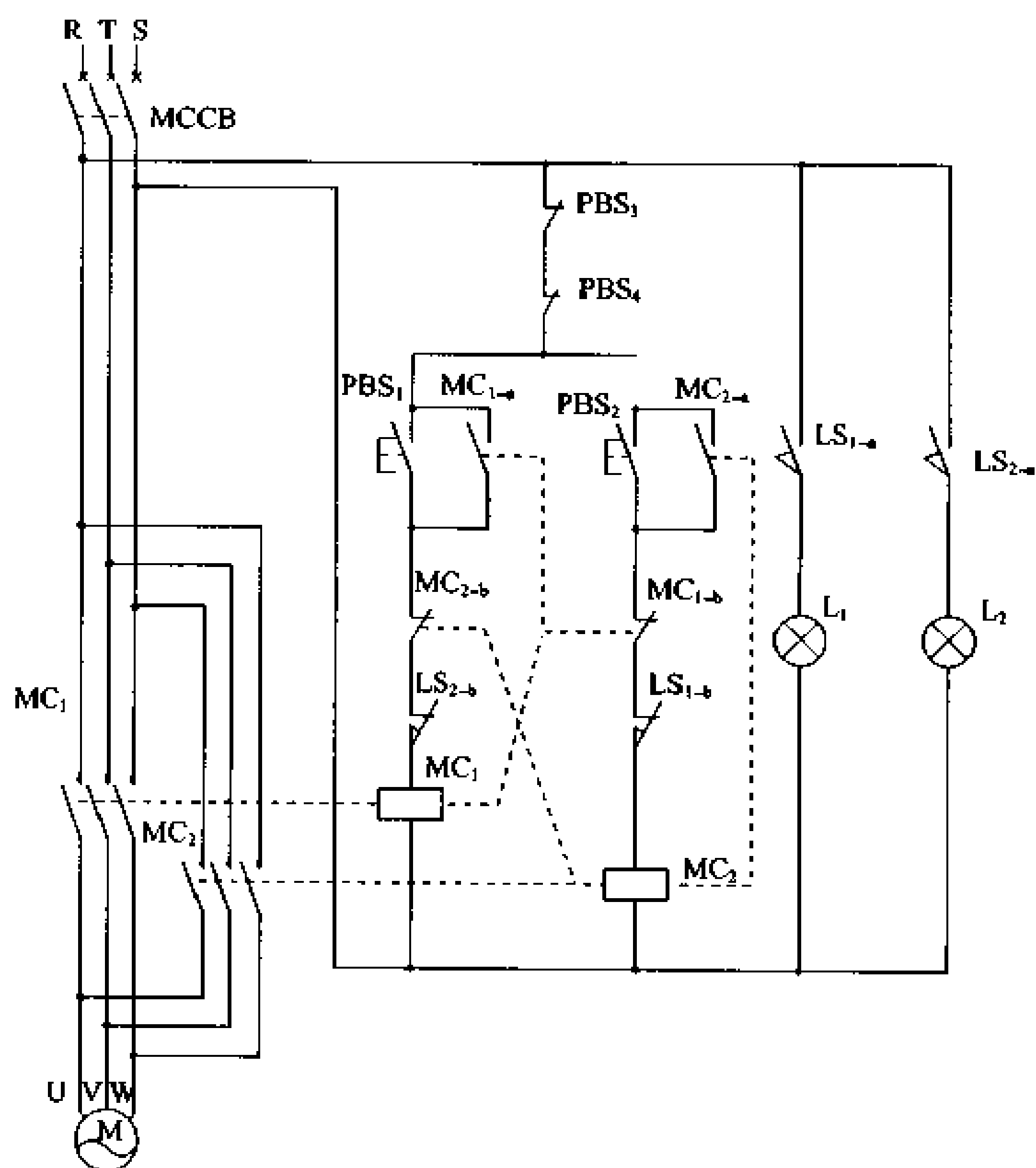


图 7.31 运送饭菜用小型升降机的顺序图

停止,指示灯  $L_2$  点亮,触点  $MC_1$  复位,故联锁被解除。

另外,如果电动机  $M$  在运转中,异常时用的开关  $PBS_3$  和  $PBS_4$  被按下,因为这时触点  $PBS_3$  和  $PBS_4$  开着,所以,电动机  $M$  就在原位置处停下。图 7.32 给出了时间图。

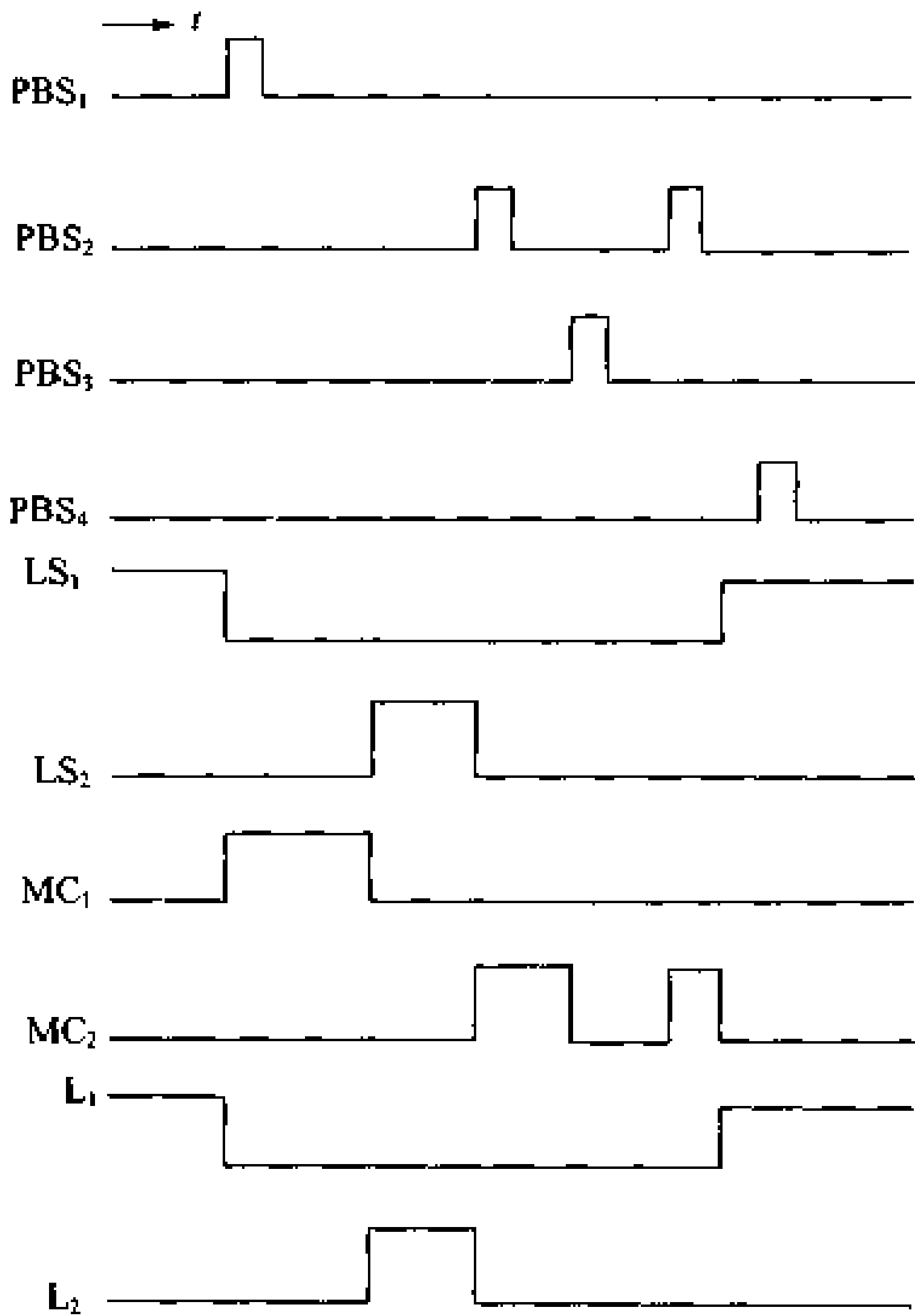


图 7.32 运送饭菜用的小型升降机的时间图

如果是实际的运送饭菜用小型升降机,它的控制更加复杂。例如,要安装一个能将饭菜运送到三层以上的各层的升降机,其上还要装有到各层可取出饭菜窗口的自动门,以及告知人们升降机到达各层的蜂鸣器等一些附加装置。

# 12 反馈控制

## □ 要点

所谓反馈控制(feedback control),就是从动作结果来判断控制是否正确,如果不正确,那就要对动作加以修正,最后得到稳定控制系统的那样控制。

人们现在日常使用的家用电气产品中几乎都安装了微处理机的反馈控制系统。

## □ 解释

### ● 控制的概要

控制系统

方块图

被控量

在控制系统(control system)中,为了了解输入输出和信号的传送状况,常将组成控制系统的各单元用一方块围起来,并用箭头表示出输入输出信号。称这个控制图示为方块图。图 7.33 是表示反馈控制系统的原理图。它把被控量(controlled variable)的一部分,连续或间断地取出并将其反馈到输入端,然后与目标值进行比较,并进行反复修正,最后使控制量和目标值达到一致。这就称为反馈控制。

如图 7.33 所示,将被控量与目标值进行比较的反馈称为主反馈(primary feedback)。这样的反馈控制系统就形成了闭合电路。

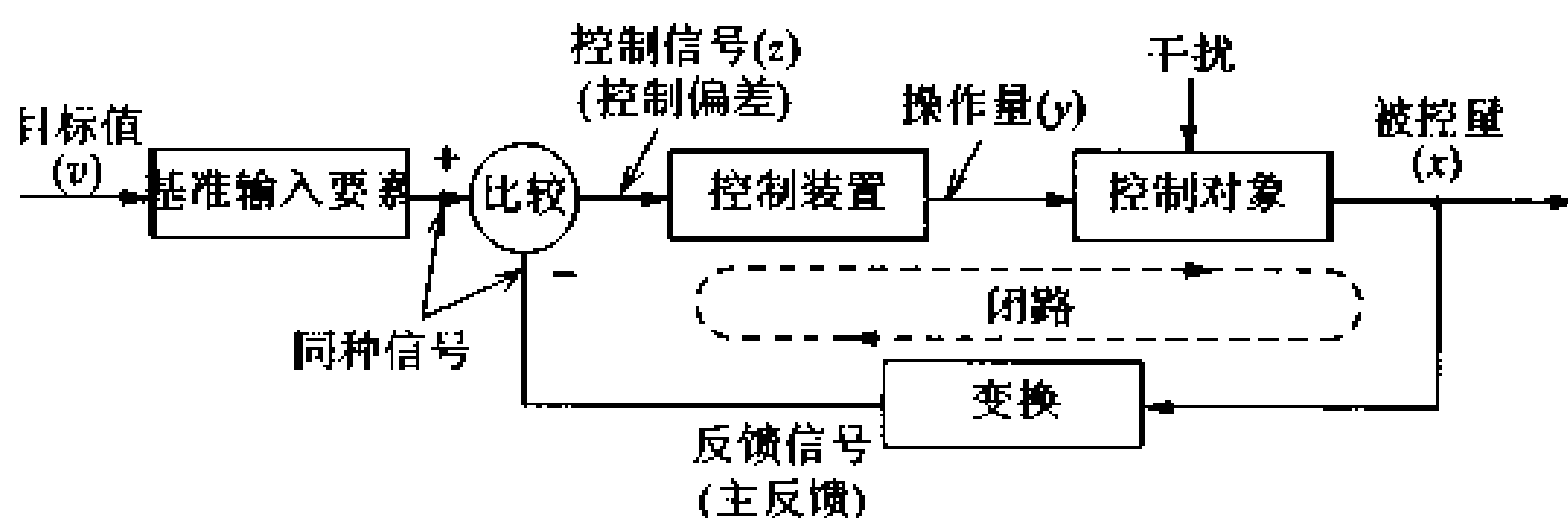


图 7.33 反馈控制的原理

控制信号

控制装置

操作量

图 7.33 是将输出信号和目标值进行比较并将其差的控制信号传递给控制装置。在控制装置中产生出被控对象的操作量(manipulated variable),并使被控对象达到目标值。这时要注意,目标值和被控量进行比较时必须是同一类的量,所以在设置标准输入时要把它变换成和反馈信号同类的信号,或者把被控量变换成和目标值同类的信号之后,才能进行比较。

图 7.34 是表示把电炉内温度控制在一定值上的反馈控制实

## 手动控制

## 反馈自动控制

例,人观看温度计时,如发现炉内温度发生了变化,就用调压器调节电压来控制炉内温度。将这样借助手进行控制的称作手动控制。把不借助手,能自动进行控制的称作反馈自动控制(automatic feedback control)或者简称反馈控制。如果将图 7.34 用方块图进行具体表示,那就是图 7.35。

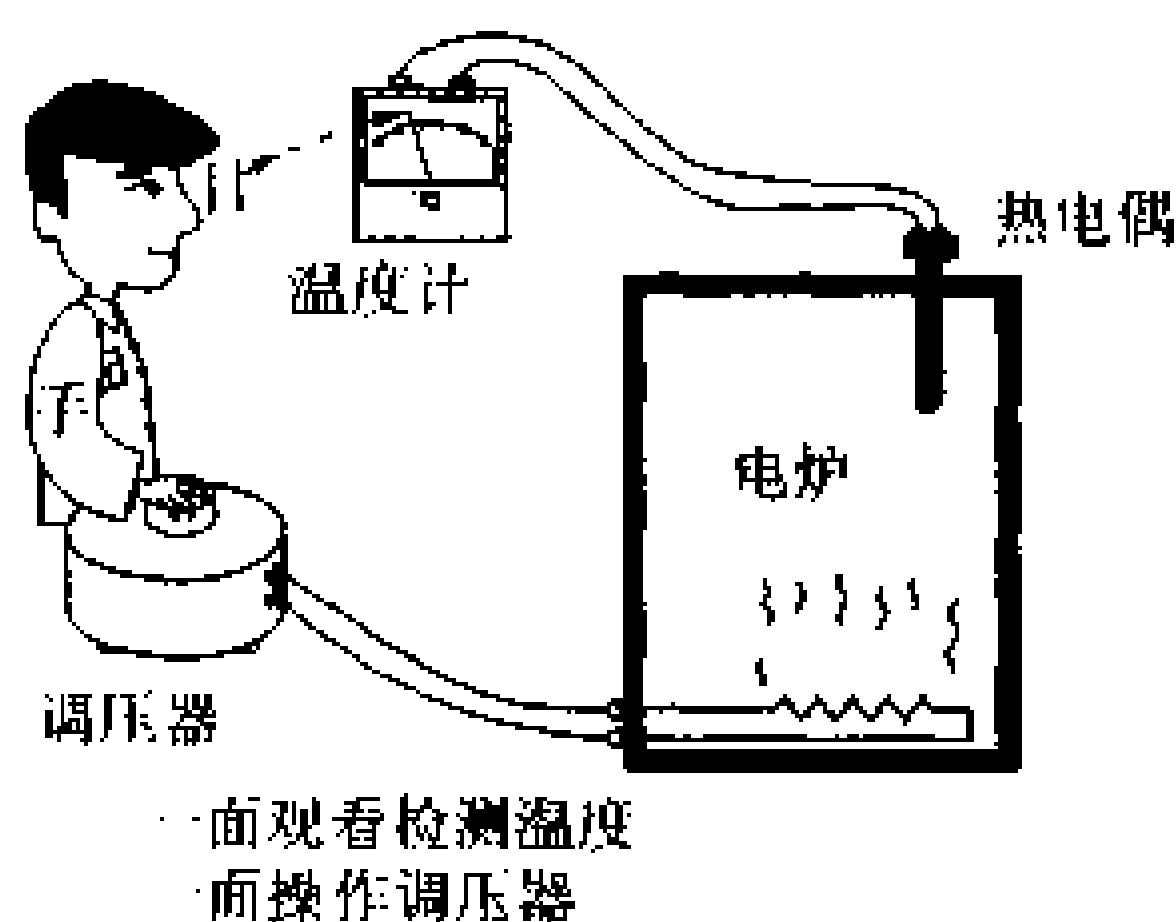


图 7.34 炉内温度控制例

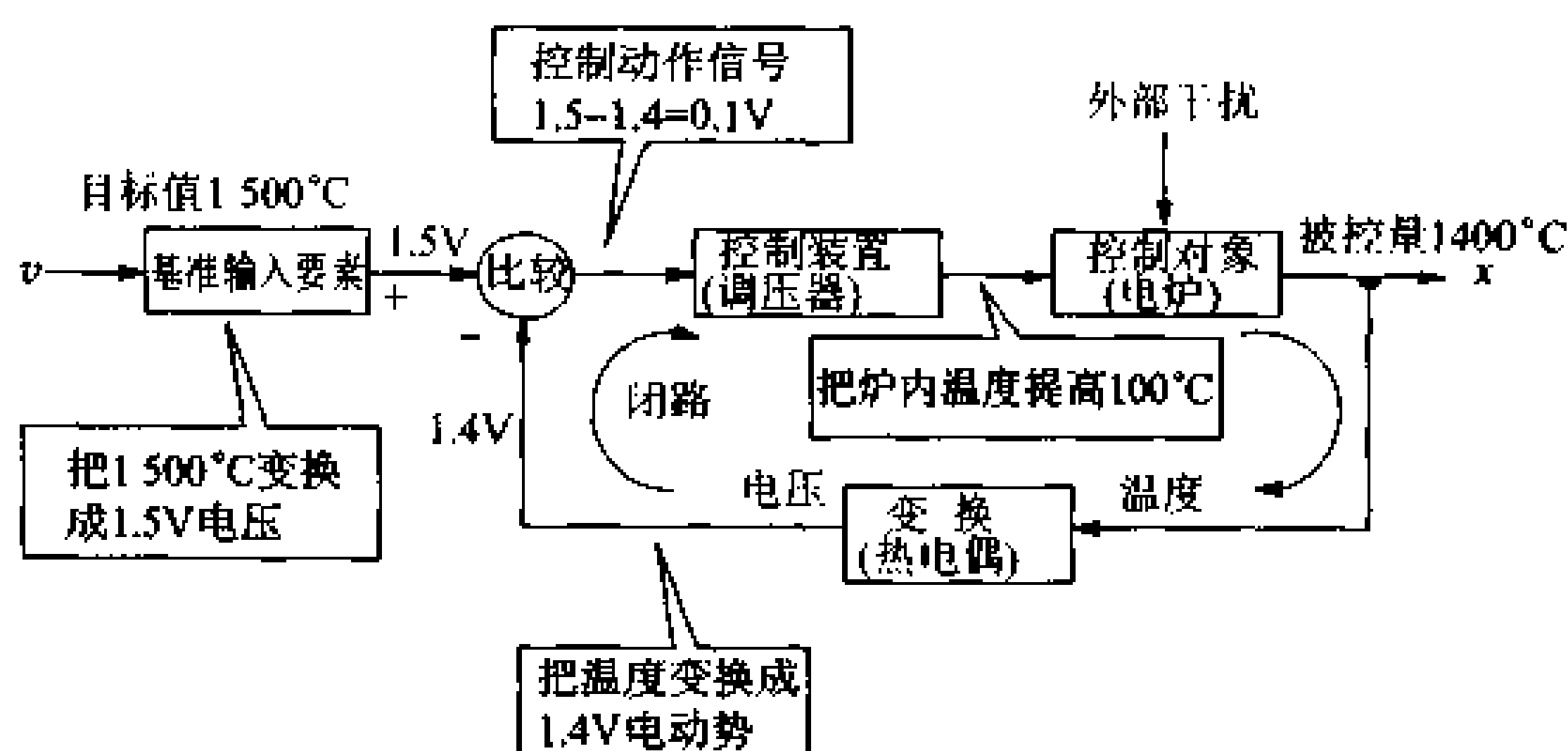


图 7.35 温度控制系统的方块图

例如,目标值定在  $1500^{\circ}\text{C}$  (这时热电偶的电动势是  $1.5\text{V}$ ,再假定温度每变化  $100^{\circ}\text{C}$ ,其电动势变化  $0.1\text{V}$ ),如果被控量已是  $1400^{\circ}\text{C}$ ,那么,这时的热电偶的电动势就是  $1.4\text{V}$ 。如果把它与基准输入一比较,就有  $0.1\text{V}$  ( $100^{\circ}\text{C}$ ) 的差值。然后用调节调压器使这个差值减少,并使炉内温度能上升  $100^{\circ}\text{C}$ 。

## 外来干扰

所谓外来干扰就是指扰乱控制系统正常状态的外来因素的作用。例如开关炉门时,由于炉内外温度之差而引起炉内温度发生



了变化这就是受到了外来干扰。不过在反馈控制中即使有这种外来干扰,因为由于不断地进行目标值和被控量的比较以及反复进行校正,所以,完全能够进行稳定的控制。

### ● 反馈控制的特性

目标值和被控量有偏差时,将校正动作调整适当强度是非常重要的,调整强度过强或过弱都不好。图 7.36 给出了这样的例子。

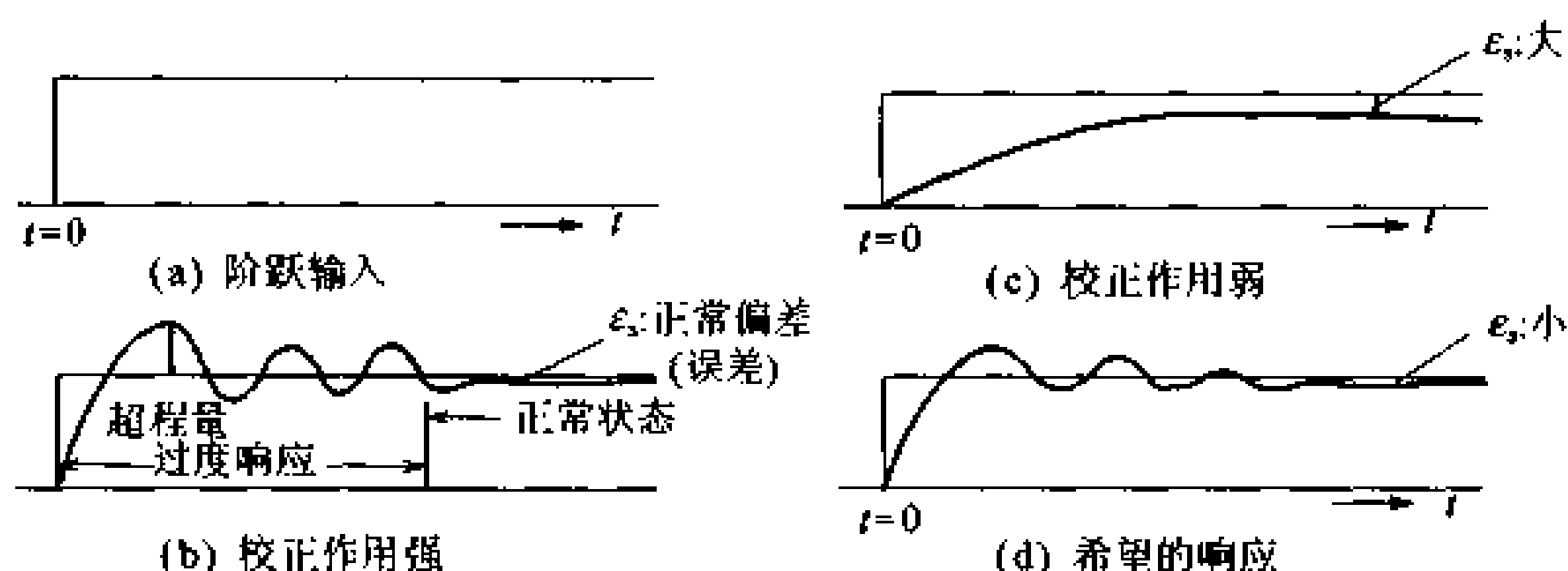


图 7.36 对阶跃输入的响应

阶跃输入  
阶跃响应

图 7.36(a)是从输入某状态开始,突然发生了瞬间变化的阶跃信号(step signal),称这样的输入为阶跃输入。图 7.36(b)以后的图表示对阶跃输入的响应图,称此响应为阶跃响应(step response)。图 7.36(b)因为校正作用过强,调整过大,形成了振荡。图 7.36(c)因为校正作用过弱,所以接近目标值迟缓。因此,如果把校正作用调整到适当的强度,就能得到图 7.36(d)那样希望的响应。

过渡响应  
稳态  
稳态误差

从给定阶跃输入开始到输出达到某一定值的响应叫作过渡响应。把这之后达到稳定状态的响应叫作稳态(steady state)。将稳态时出现的误差叫作稳态误差(steady state deviation)。反馈控制有如下一些特点:

- ① 被控对象的特性若不够理想,可由反馈进行调整;
- ② 若受外部干扰等影响,也可用反馈将其影响的一部分消除;
- ③ 若使被控对象的特性发生变化(如制造过程和经年老化变化等),反馈控制不受影响;
- ④ 不用借助人的手就能进行稳定的控制。

如果再和计算机相组合,更可提高生产率和防止危险事故的

发生。因为反馈控制有这些优异的特点,所以,反馈在自动控制中起着重要作用。

## □ 相关知识

控制系统的分类,如果把目标值用时间变化来区分,那它可分成如下各类。

### 恒值控制 过程控制

**恒值控制:**是把目标值设定为一定值而进行的控制。例如化纤制造和植物等的培养以及原油的精炼等以过程控制为主的几乎都是恒值控制。过程控制是把温度、压力、流量、液位和浓度等工业流程的状态物理量作为被控量的控制。如制造业和加工业,以及为这些工业生产提供环境条件的主要控制都是这种控制。

### 跟踪控制 伺服机构

**跟踪控制:**是随时间经过的同时,跟踪被控量任意变化的控制。多用在像雷达跟踪飞机那样的伺服机构(随动系统)里,伺服机构是把物体的位置和姿态以及方向等作为被控量。雷达尾随着飞机的位置,并把用热敏元件感知的来自物体位置和方位变化的红外线信号作为被控量。

### 程序控制

**程序控制:**是一种目标值按照程序变化的控制。用于热处理炉和退火炉以及电梯速度控制等。也可以说它是跟踪控制的一种。除上述控制外,还有如下一些控制。

### 自力控制

**自力控制(direct control):**为了驱动控制装置而从被控对象直接得到能量而进行的一种控制。用于电暖炉温度控制的金属调温器上和用于水洗便池的水位控制的浮漂上等。这种控制虽然不能进行高精度的控制,但是它的优点是结构简单、价格便宜。

### 非自力控制

**非自力控制(indirect control):**是从其它方面得到驱动装置能量的控制。例如把用浮子检测水位的信息变为电气信号来驱动电动机或开关电磁阀那样的控制。

# 13 频率传递函数和阶跃响应

## □ 要点

控制系统的特性取决于构成这个系统的各种要素。为了解析控制特性,就要从控制系统和各要素以及电路等特性来求出输出对输入的比。称这个比为传递函数。当把传递函数用角频率  $\omega$  进行表示时,又称这种用  $\omega$  表示的函数为频率传递函数。有关控制系统的响应也可用频率传递函数来求解。

## □ 解释 ● 频率传递函数

如图 7.37 所示的电路,对输入加一角频率为  $\omega(\text{rad/s})$  的正弦交流电压  $v_i$  时,输出为  $v_o$  的电路特性如下:

$$v_o = \frac{1}{C} \int i dt \quad (7.1)$$

$$v_i = Ri + v_o \quad (7.2)$$

由式(7.1)、(7.2)可求得下式:

$$CR \frac{dv_o}{dt} + v_o = v_i \quad (7.3)$$

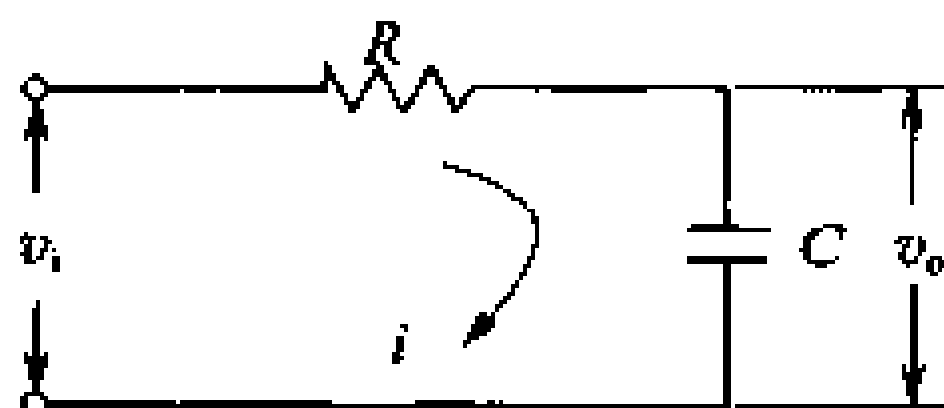


图 7.37 RC 电路

解式(7.3),可求得相应的  $v_i$  的  $v_o$  值,这里假定  $v_i$  和  $v_o$  的时间函数为  $v_i(t)$  和  $v_o(t)$ 。再把它用复数矢量进行处理,那么,  $v_i$ 、 $v_o$  可用  $j\omega$  的函数形式的  $v_i(j\omega)$  和  $v_o(j\omega)$  表示。因此,频率传递函数  $G(j\omega)$  应为下式:

$$G(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{1 + j\omega T} \quad (7.4)$$

上式中,令  $CR = T$ 。

一阶滞后环  
节的频率传  
递函数

把这种频率传递函数用  $j\omega$  的一次式给出的函数称为一阶滞后环节的频率传递函数。求频率传递函数时,需要进行如下变换:

$$\frac{d}{dt} = j\omega$$

$$\int dt = \frac{1}{j\omega}$$

在一阶滞后环节中,因为频率传递函数的一般式可如式(7.5)那样用复数表示,所以,把复数分为实部和虚部,就可求出绝对值和辐角。

$$G(j\omega) = \frac{k}{1+j\omega T} = \frac{k}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} \angle -\tan^{-1}(\omega T) \quad (7.5)$$

称式中的  $k$  为增益常数(在前面的  $RC$  电路中,它是 1),称  $T$  为时间常数(time constant)。

在  $RLC$  串联电路中,如果把  $C$  两端的电压作为输出时,因为上式是用  $j\omega$  的二次式表示的,所以称此时函数为二阶惯性环节的频率传递函数。

$$G(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega RC + (j\omega)^2 LC} \quad (7.6)$$

二阶惯性环节以上的环节称为高阶惯性环节。如果认为高阶惯性环节是纯滞后环节和一阶惯性环节的结合,那么,高阶滞后环节就很容易处理了。

纯滞后环节:就是一个系统加了输入信号,并经过一定时间后,响应还没有表现出来的环节。例如,把长软管与水管的水龙头相连接,即使打开了水龙头,可是不等一定时间,水是不会从软管流出的。像这样输出输入之间具有时间迟延的环节就是纯滞后环节。假定纯滞后时间(水没有流出软管的时间)为  $L$ ,那么,这时的频率传递函数如下:

$$G(j\omega)e^{-j\omega L} \quad (7.7)$$

### ● 阶跃响应

如果解式(7.3)的微分方程,就可以求得阶跃响应的特性曲线。这里,只给出最后的结果而省略了求解的过程。假定阶跃输入为  $v_s$ ,那么,输出电压就是下式:

$$v_o = v_s(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (7.8)$$

图 7.38(a)  $RC$  电路里,  $R \approx 50k\Omega$ ,  $C \approx 10\mu F$ , 如图 7.38(b)所示,让输入电压  $v_s$  从稳态变化  $10V$  ( $v_s = 10V$ ), 试研究一下这时的过渡响应。

从所给条件可知,因为  $v_s = 10V$  (可认为它是增益常数),  $T = RC \approx 0.5s$ , 所以频率传递函数可表示如下:

$$G(j\omega) = \frac{10}{1+j\omega 0.5}$$

由此,再用式(7.8)就能求出输出电压  $v_o$  如下:

增益常数  
时间常数  
二阶惯性环节的  
频率传递函数

高阶惯性环节

纯滞后环节

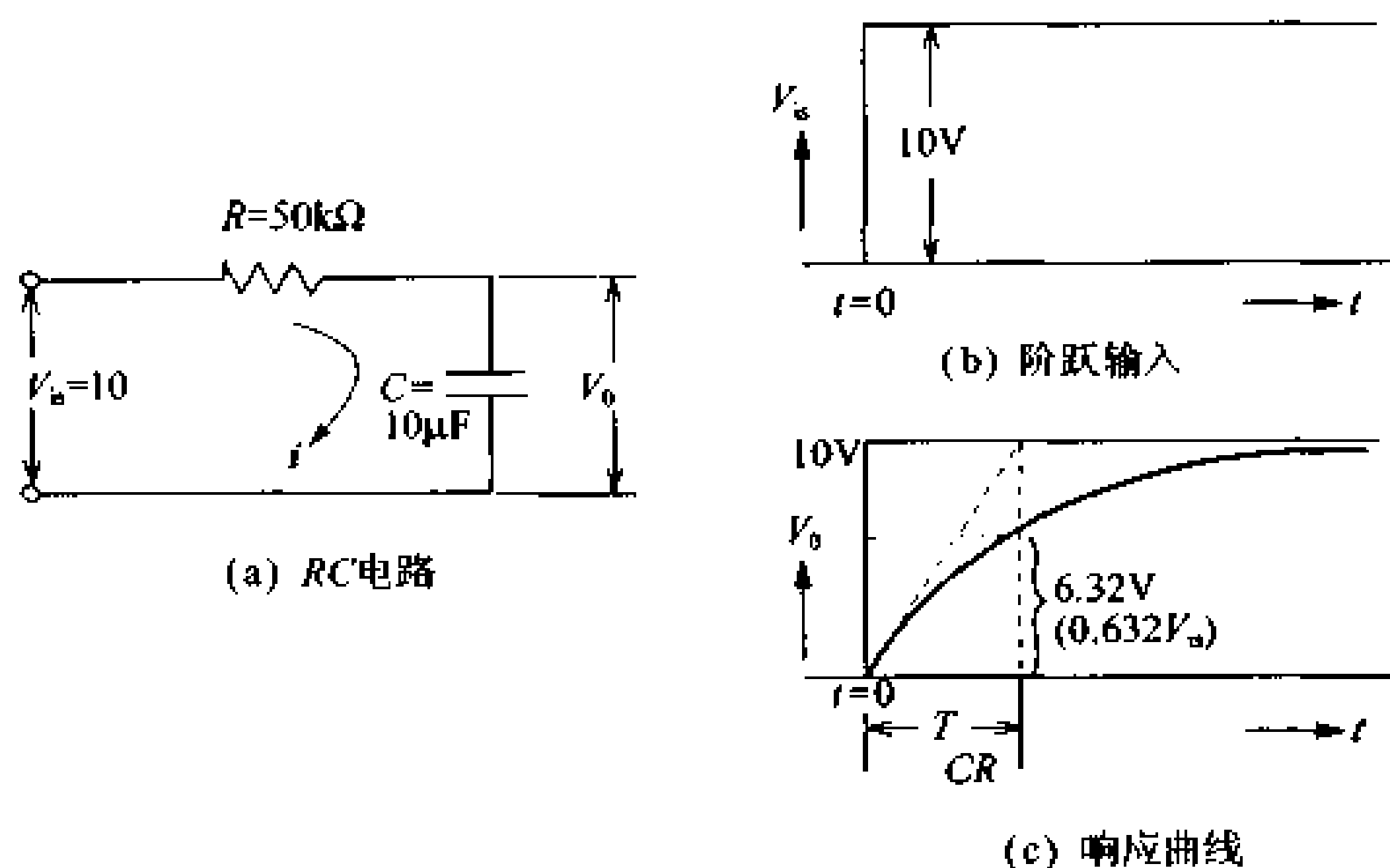


图 7.38 阶跃响应

$$v_o = 10(1 - e^{-2t})$$

表 7.3 给出了输出电压和时间  $t$  的关系数据。图 7.38(c) 就是根据表中的数据描绘出的响应曲线。

表 7.3 输出电压和经过时间的关系

$t$	0	0.1	0.2	0.5	0.8	1	2	5
$v_o$	0	1.81	3.30	6.32	7.98	8.65	9.82	9.99

## □ 相关知识 ● 二阶惯性环节

式(7.6)中,当  $RC \geq 2\sqrt{LC}$  时,因为分母的解是复数,所以,可用一阶惯性环节之和的形式来表示。

$$\begin{aligned}
 \text{〔例〕 } G(j\omega) &= \frac{1}{1 + j\omega 1.5 + (j\omega)^2 0.5} \\
 &= \frac{1}{(1 + j\omega)(1 + j\omega 0.5)} \\
 &= \frac{2}{1 + \omega} - \frac{1}{1 + j\omega 0.5}
 \end{aligned}$$

由上式,响应曲线可用下式求得。

$$v_o = 1 - 2e^{-t} + e^{-2t}$$

其中,当  $RC < 2\sqrt{LC}$  时,因为分母的解是复数,所以,不能简单地求得响应曲线。因此,要进行如下变换:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (7.9)$$

然后利用  $\zeta$  和  $\omega_n$  把传递函数进行改写, 就得到下式:

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega \frac{2\zeta}{\omega_n} + (j\omega)^2 \frac{1}{\omega_n^2}} \quad (7.10)$$

## 二阶惯性环节

称该式为二阶惯性环节,  $\omega_n$  为固有角频率 [rad/s]。称  $\zeta$  为阻尼系数, 称  $\zeta=1$  时的阻尼为临界阻尼。以临界阻尼值为界把二阶惯性环节分为振荡性的和非振荡性的两类。图 7.39 是表示振荡性二阶惯性环节的阶跃响应。

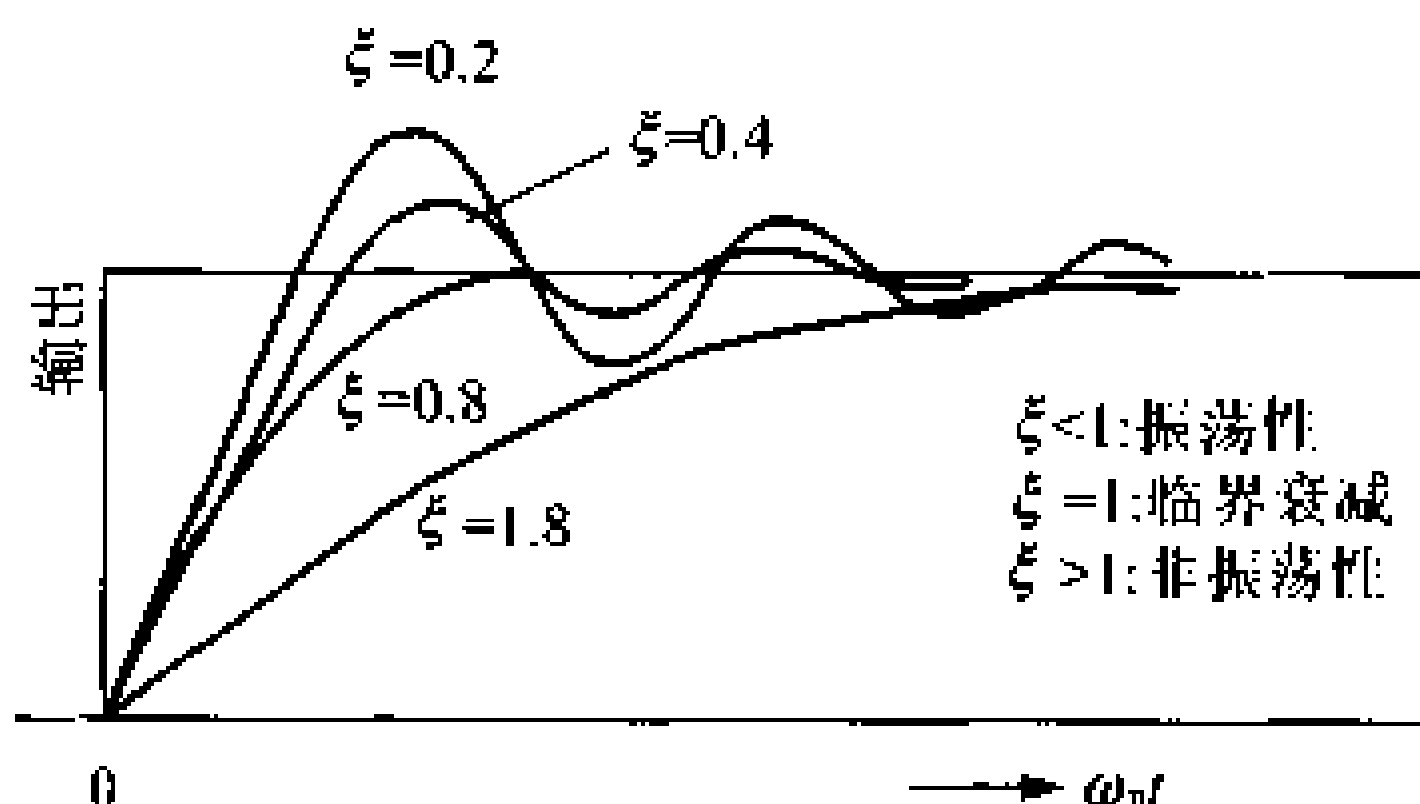


图 7.39 振荡性二阶惯性环节的阶跃响应

## ● 开环频率传递函数

为了知道控制特性, 如图 7.40 所示, 先求出沿着反馈控制系统的闭环绕行一周的各频率传递函数的积, 然后再用这个积来求出控制特性。把用这个积所表示的函数叫作开环频率传递函数 (open loop frequency transfer function)。

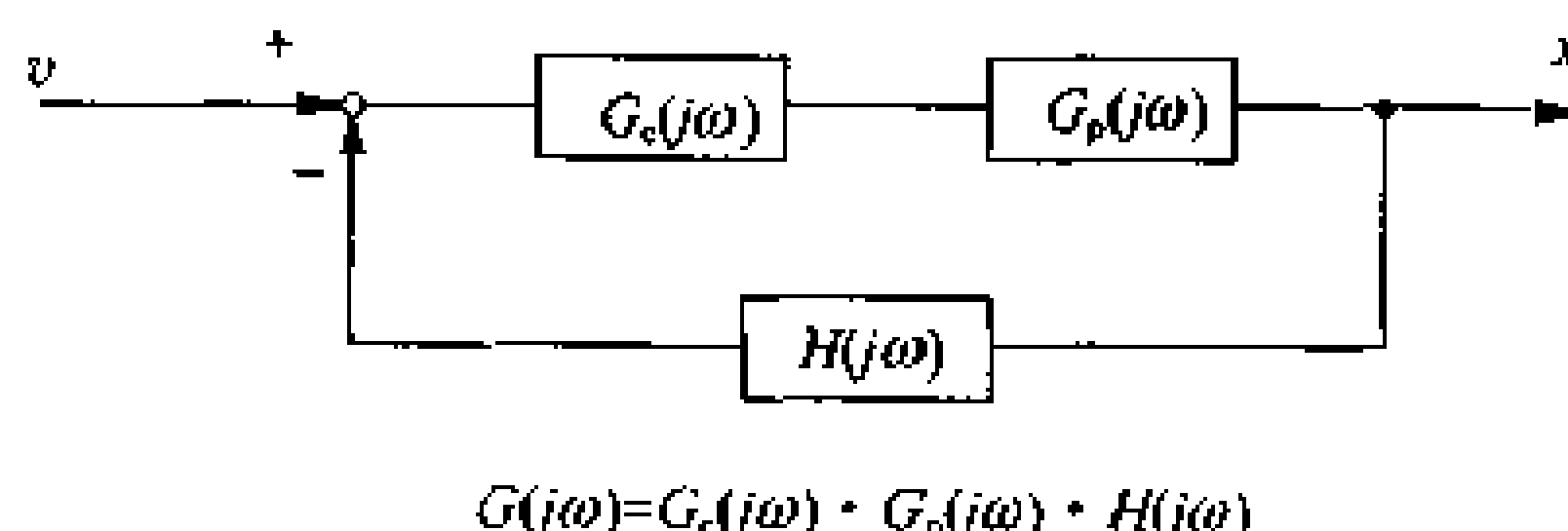


图 7.40 开环频率传递函数

# 14 方块图

## □ 要点

在控制系统里着眼于各单元的输入输出关系,如果沿着信号的流向去寻找输入输出关系就很容易把握住总体。对于这个问题,如果用方块图(block diagram)来归纳控制系统,并按照某些演算规则进行等效变换,那就容易理解了。

## □ 解释

### ● 方块图的画法和变换

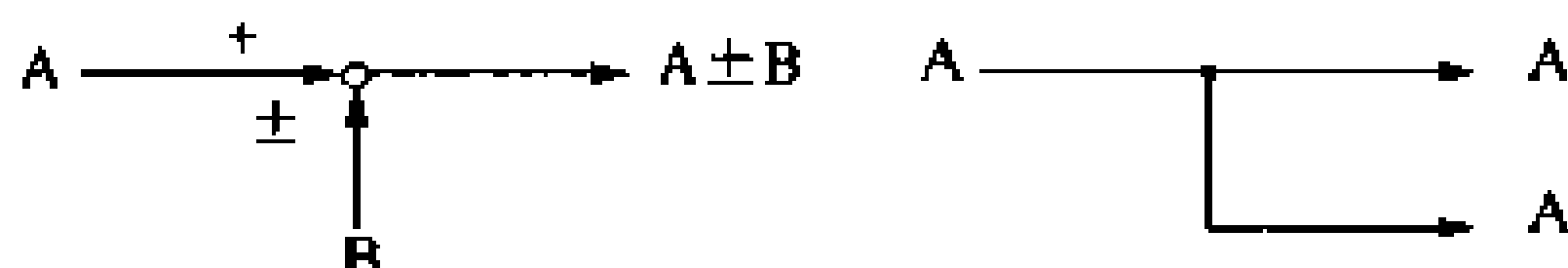
在方块图里,有若干个演算规则。将其中主要的都归纳在图 7.41 和图 7.42 里。

### ● 方块图的表示法

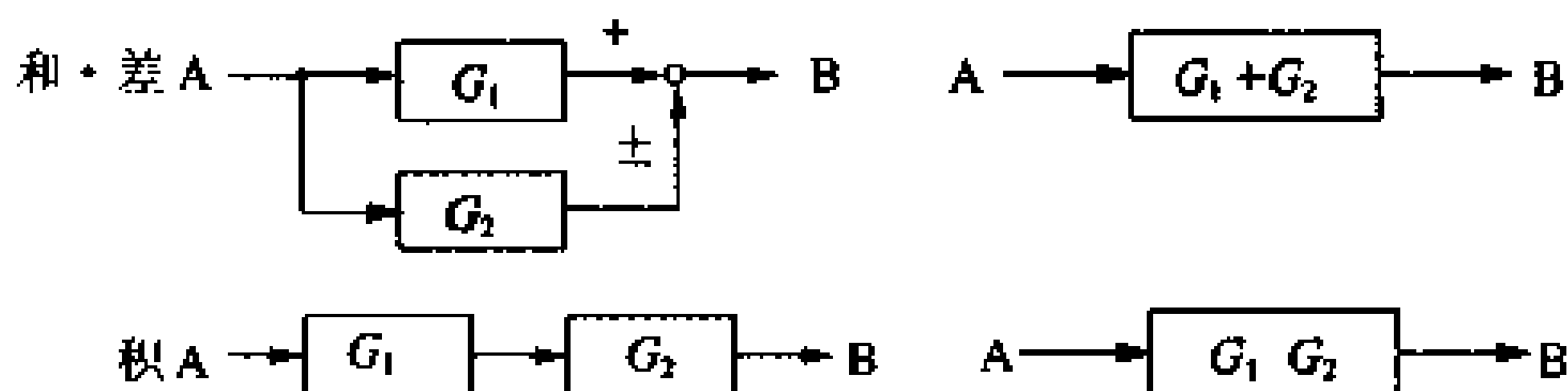
用前面学过的  $RC$  电路,试制作一个方块图:

(1) 如果从  $v_i = Ri + v_o$  求  $i$ , 则

$$i = \frac{1}{R}(v_i - v_o)$$



(a) 相加点与引出点  
相加点用○符号  
引出点用·符号

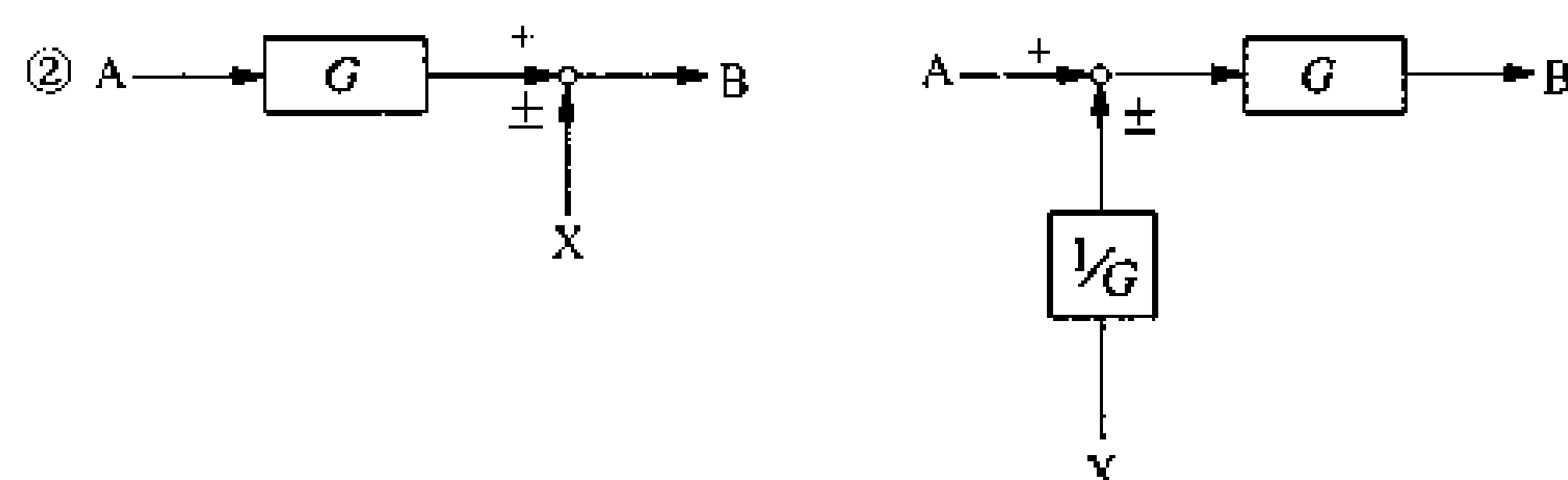
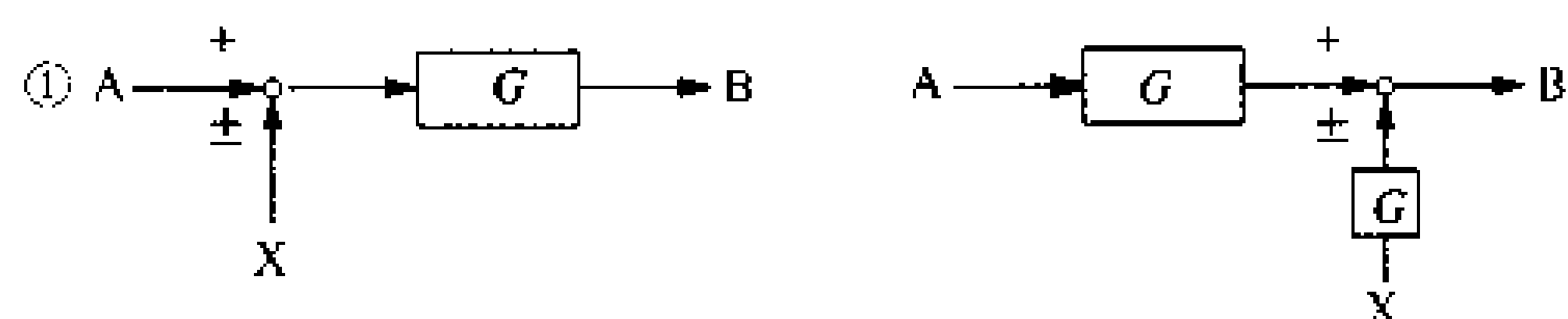


(b) 和·差与积

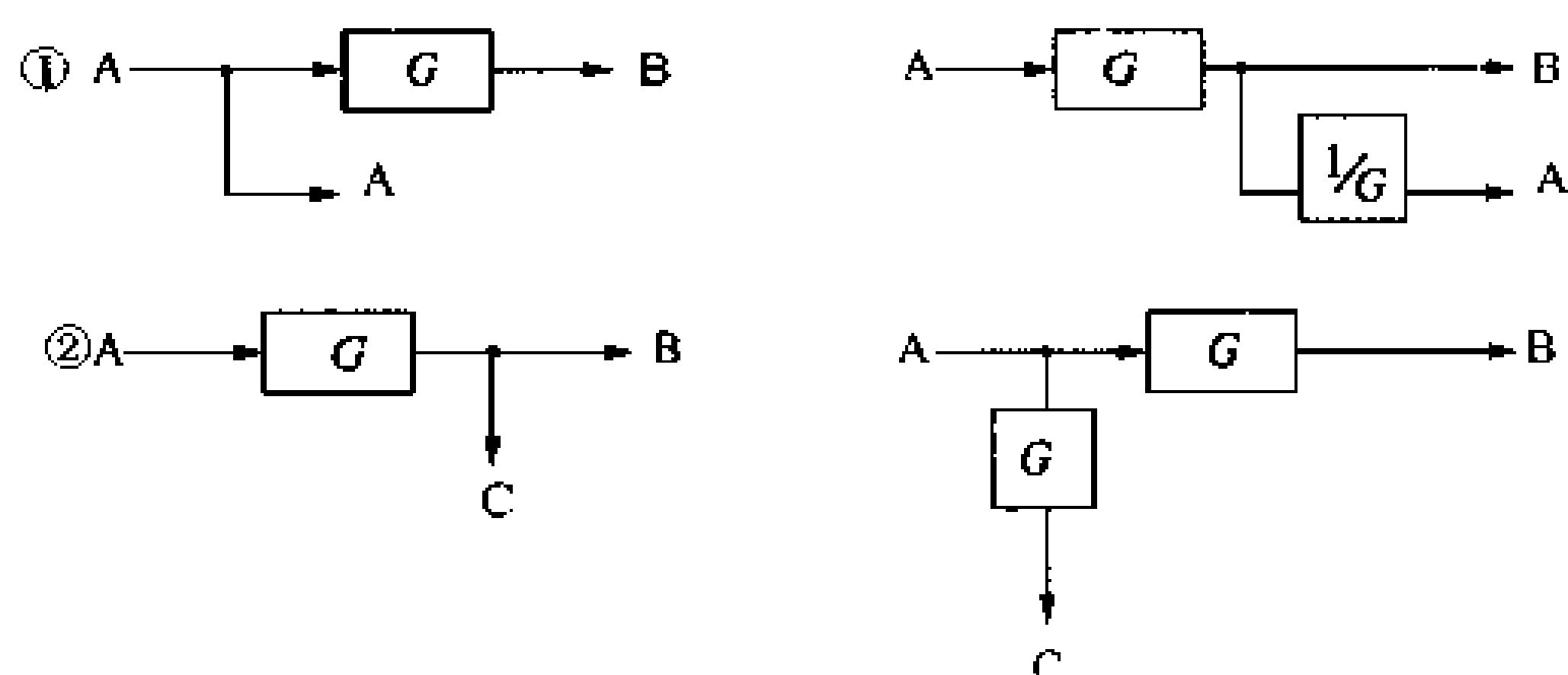


(c) 相加点的交换

图 7.41 图 1 方块图的演算(1)



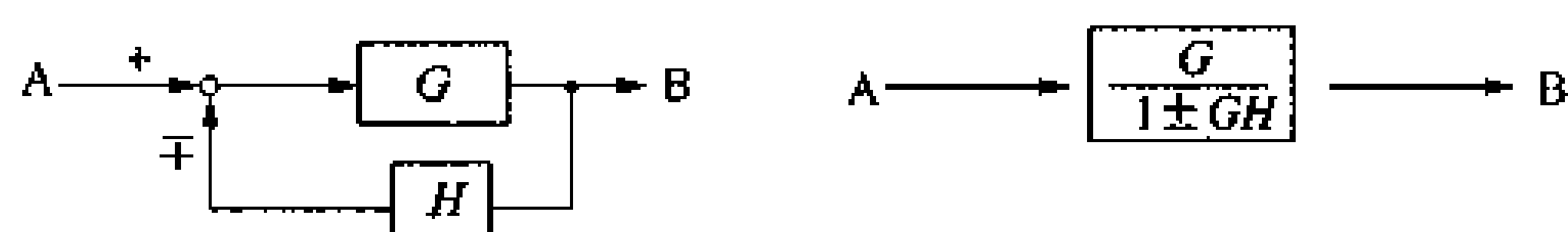
(d) 相加点的移动



(e) 引出点的移动



(f) 输入输出的交换



(g) 反 馈

图 7.42 方块图的演算(2)

如果把  $i$  用矢量表示, 就得下式:

$$I(j\omega) = \frac{1}{R} \{V_i(j\omega) - V_e(j\omega)\} \quad (7.11)$$

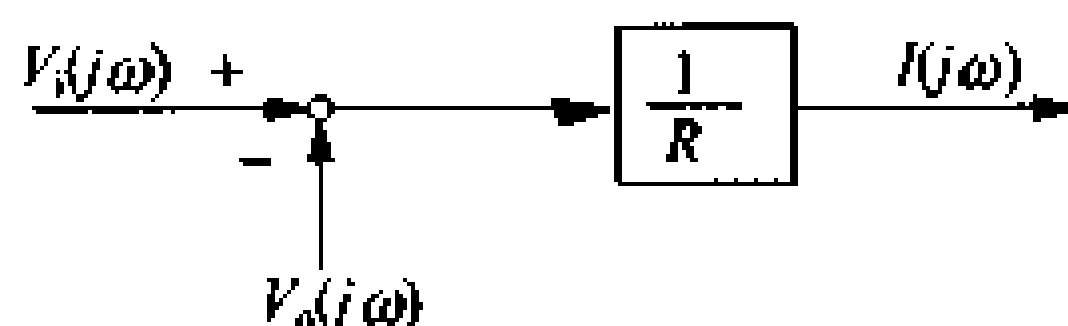
$$(2) \quad v_e = \frac{1}{C} \int i dt$$



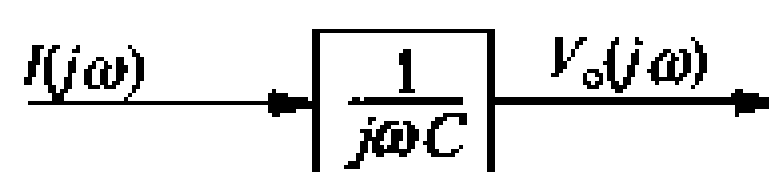
同样用矢量表示  $v_o$ , 就得下式:

$$V_o(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} I(j\omega) \quad (7.12)$$

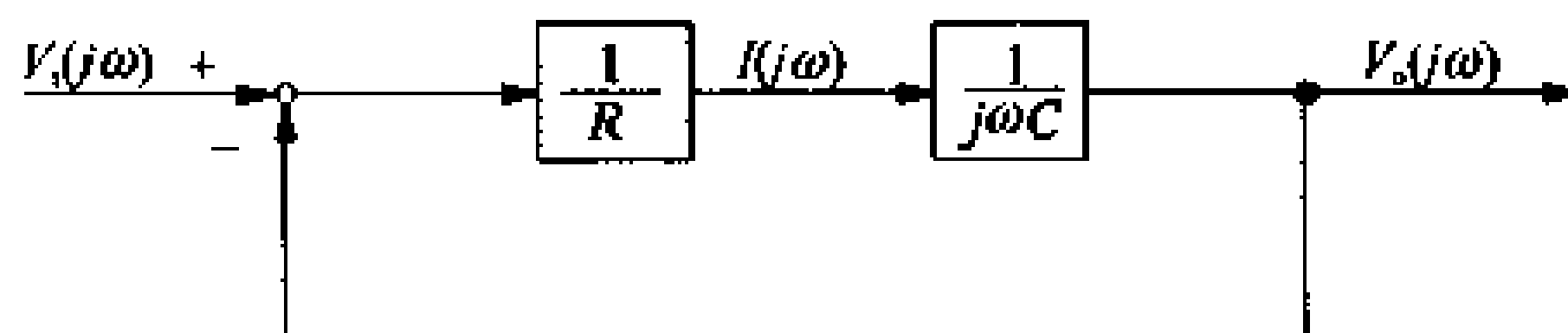
如将式(7.11)和式(7.12)表示成方块图, 就得到图 7.43(a) 和 (b)。把 a 和 b 方块图与信号流向合并起来, 就是图(c)。再进行等效变换, 就得图(d)。这一结果与 7.13 节中求得的频率传递函数相一致。



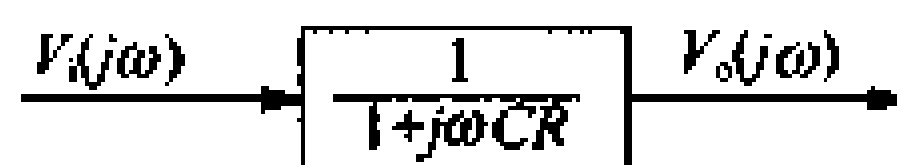
(a) 式(7.11)的图式



(b) 式(7.12)的图式



(c) 由式(7.11)和式(7.12)合成的方块图



(d) 等效变换后的方块图

图 7.43 RC 电路的方块图

# 15 频率响应

## □ 要点

如果在某个单元上施加一正弦波信号,并将该正弦信号,和输出信号进行比较,然后从其振幅比和相位差来研究单元特性,这就是频率响应(frequency-response)。在研究频率响应中,有矢量轨迹法和波德(baud)图法两种。

## □ 解释 ● 矢量轨迹

因为频率传递函数是用矢量表示的,所以,常把传递函数的分母进行有理化,把它分为实部和虚部后,再求绝对值和幅角,这就是式(7.5)。式(7.5)中,当 $k=1, T=1$ 时,让 $\omega$ 的值从0变化到 $\infty$ (即 $0 \sim \infty$ )。这时所描绘出的矢量轨迹是一个半径为0.5的半圆。另外,在二阶惯性环节情况下, $\omega=\infty$ ,幅角 $\varphi$ 等于 $-180^\circ$ 。图7.44给出了这个轨迹。

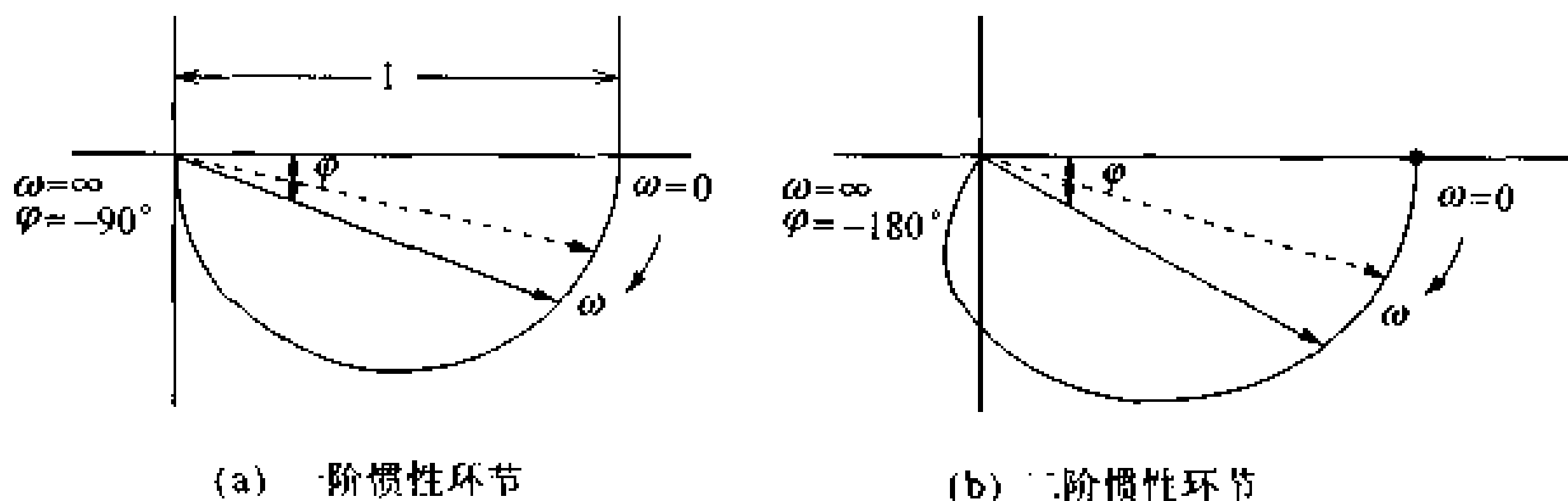


图 7.44 矢量轨迹

## ● 波德图

波德图是用半对数方格纸并取角频率 $\omega$ 的常用对数为横轴,取频率传递函数的增益特性(dB)和相位特性( $^\circ$ )为纵轴画出的。一阶惯性环节时,可得如下一些结果:

### 增益特性

#### ① 增益特性

$$g = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} = -10 \lg(1 + \omega^2 T^2) \quad (7.13)$$

研究一下上式中不同 $\omega$ 范围的 $g$ ,则有:

① 当 $\omega^2 T^2 \ll 1$ 时,则得

$$g_1 = -10 \lg 1 = 0 \text{ dB}$$

② 当  $\omega^2 T^2 \gg 1$  时, 则得:

$$\begin{aligned} g_2 &= -10 \lg \omega^2 T^2 = -20 \lg \omega T \\ &= -20 \lg \omega - 20 \lg T \text{ dB} \end{aligned}$$

转折频率

$g_2$  是一条在  $\omega$  每增大 10 倍时下降 20dB 的斜直线[单位是 10 进位(decade)]。直线和  $g_1$  的交点  $\omega$  为  $\omega_s = 1/T$ , 称  $\omega_s$  为转折频率(或转折角频率)。这时的增益值如下:

③ 当  $\omega^2 T^2 = 1$  时

$$g_3 = -10 \lg(1+1) \approx -3 \text{ dB}$$

描绘增益特性时, 是在半对数方格纸上, 根据  $g_1, g_2, g_3$  的关系式, 如图 7.45 所示那样, 先画二条相交于  $\omega_s$  点的  $g_1$  与  $g_2$  的直线, 然后再画一条始于  $\omega_s$  下 3dB 的  $g_3$  直线, 最后作一条通过  $g_3$  左端的  $g_1, g_2$  的渐近曲线, 此曲线就是表示增益特性的。

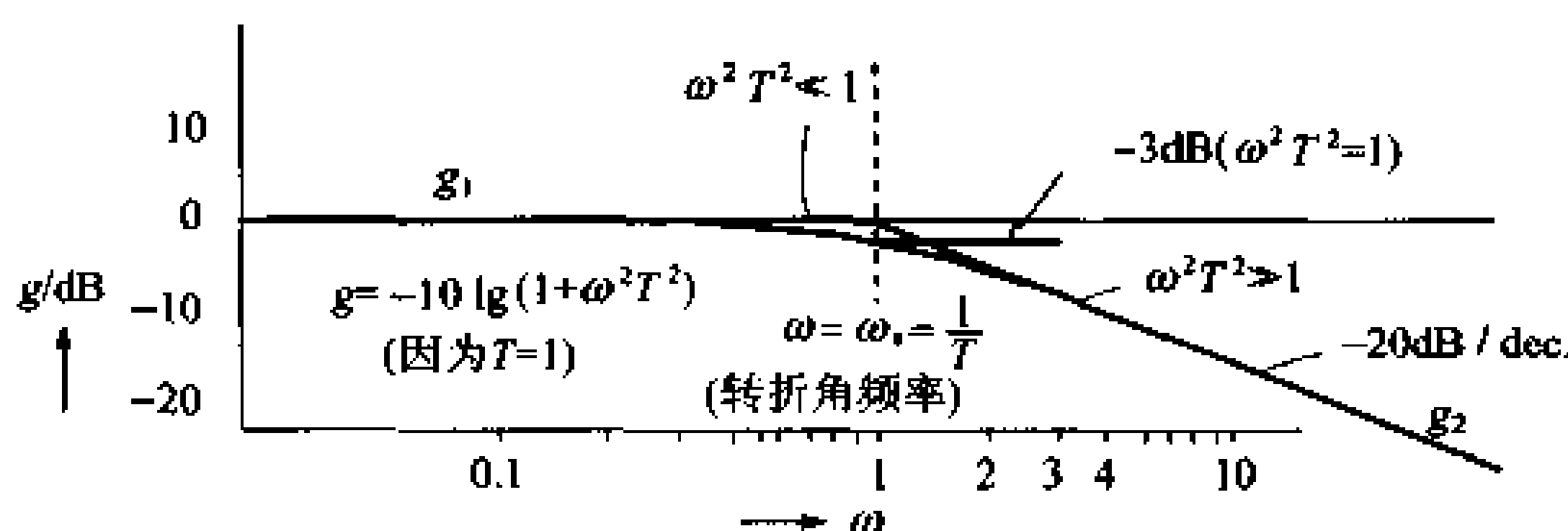


图 7.45 增益特性( $T=1$ 时)

② 相位特性

$$\varphi = \tan^{-1}(\omega T) \approx -\tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)$$

由上式可知, 相位特性, 在  $\omega \ll \omega_s$  时, 接近  $\varphi = 0^\circ$ , 在  $\omega \gg \omega_s$  时, 接近  $\varphi = -90^\circ$ , 在  $\omega = \omega_s$  转折频率处为  $\varphi = -45^\circ$ 。图 7.46 给出了这一相位特性。

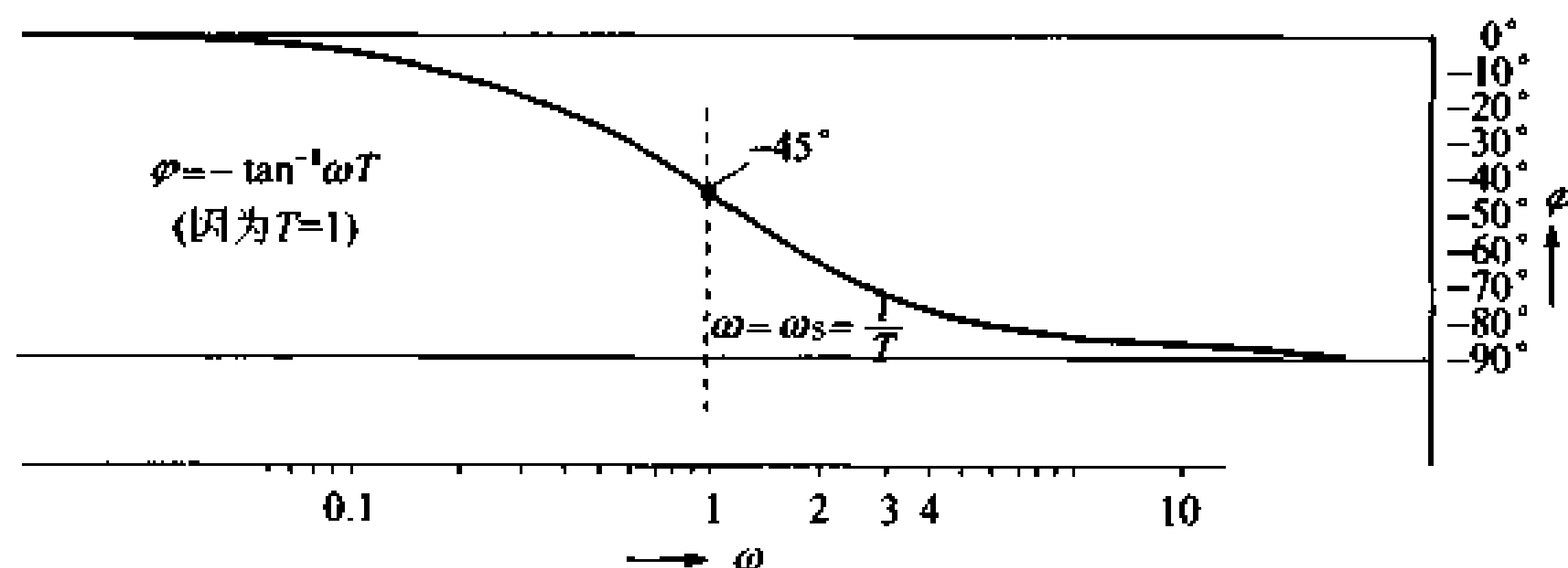


图 7.46 相位特性( $T=1$ 时)

### ③ 积分·微分环节

积分环节的频率传递函数可用下式给出:

$$G(j\omega) = \frac{\kappa}{j\omega T} = \frac{\kappa}{\omega T} \angle -90^\circ \quad (7.14)$$

因此,增益和相位特性可用下式给出:

$$g = 20 \lg \frac{\kappa}{\omega T} = 20 \lg \frac{\kappa}{\omega T} - 20 \lg \omega$$

$$\varphi = -90^\circ$$

微分环节的频率传递函数可用下式给出:

$$G(j\omega) = j\omega T \kappa = \omega T \kappa \angle 90^\circ \quad (7.15)$$

$$g = 20 \lg \omega T \kappa = 20 \lg T \kappa + 20 \lg \omega$$

$$\varphi = 90^\circ$$

这个结果表明积分环节的增益特性是具有斜率为  $-20 \text{ dB/dec}$  的直线。其相位特性是  $-90^\circ$  的直线。而微分环节的增益是具有斜率为  $20 \text{ dB/dec}$  的直线。其相位特性是  $90^\circ$  的直线。图 7.47(a) 和 (b) 给出了积分环节和微分环节 (设  $T=1, \kappa=2$ ) 的波德图。

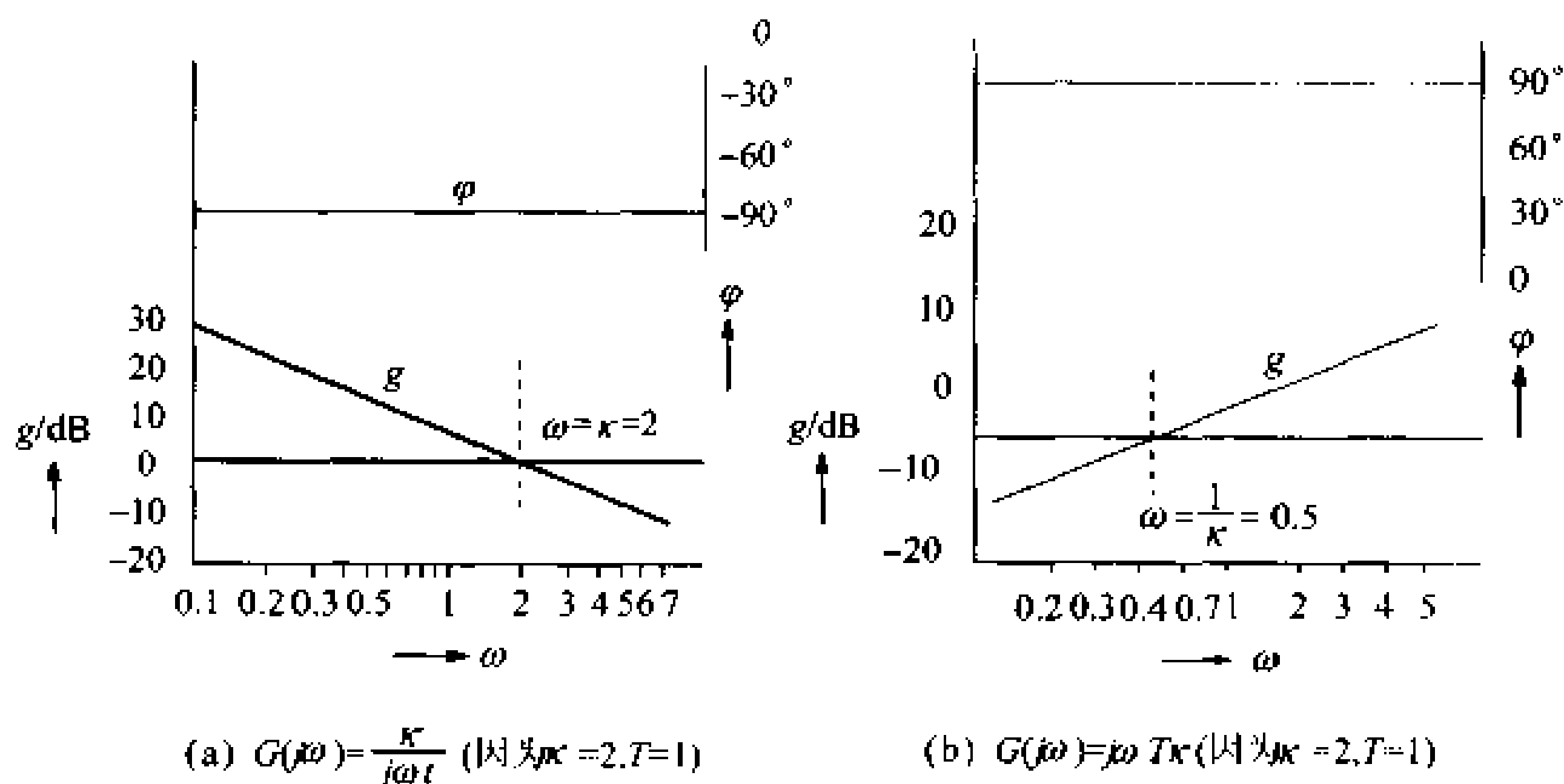


图 7.47 积分和微分环节的波德图

### ④ 纯滞后时间

如果从式(7.7)求增益和相位角,就得如下结果:

$$g = 20 \lg 1 = 0 \text{ dB}$$

$$\varphi = -57\omega l. [^\circ]$$

这个结果是表示增益特性为 0dB 的直线, 相位特性是  $\omega = 1/L$ , 而且是一条通过  $-57^\circ$  的曲线。图 7.48 给出了  $L=1$  时的波德图。

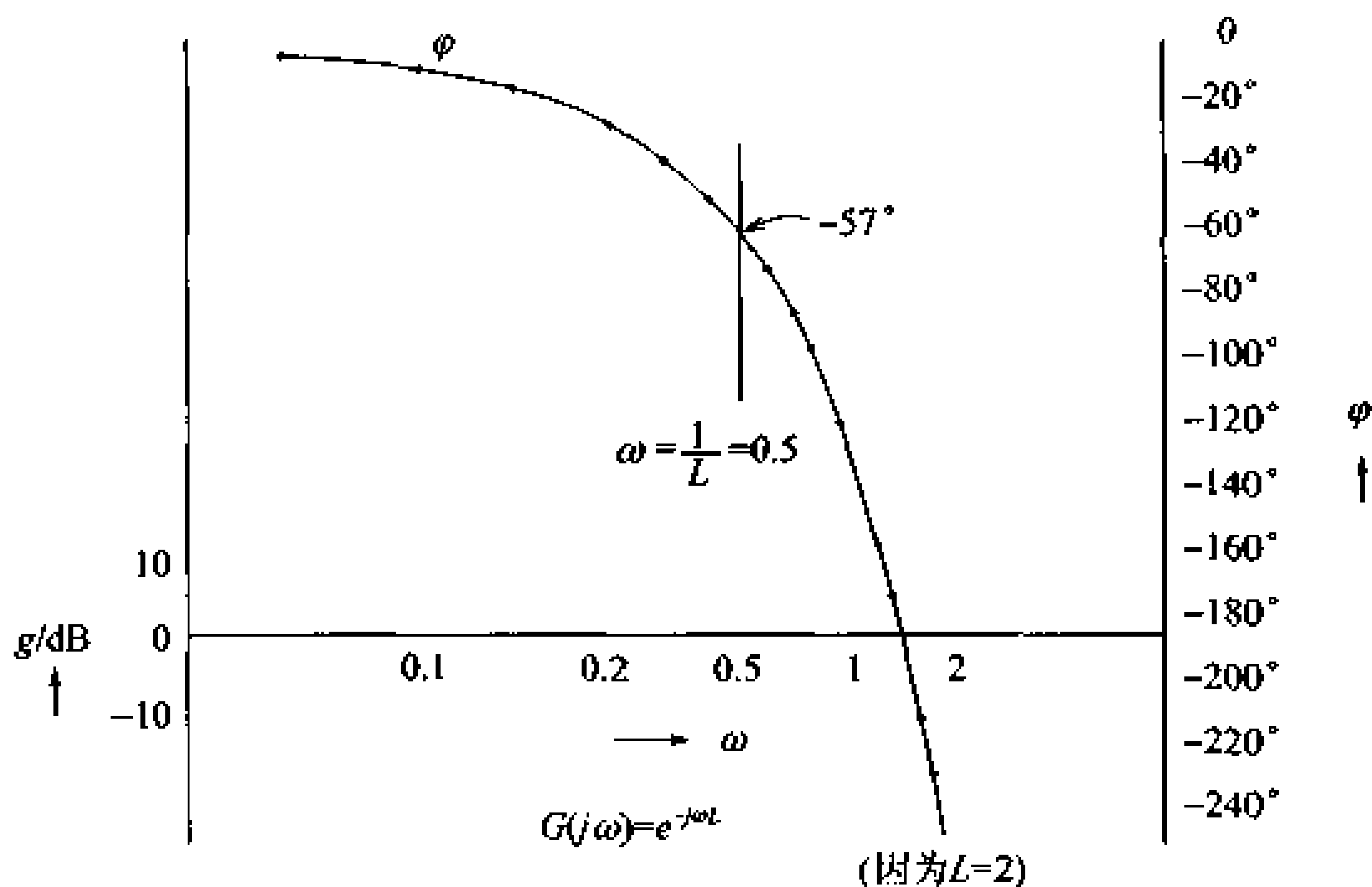


图 7.48 纯滞后环节的波德图

#### ⑤ 纯滞后时间和一阶惯性环节的結合

纯滞后环节  $G_1(j\omega)$  和一阶惯性环节  $G_2(j\omega)$  结合起来的频率传递函数  $G(j\omega)$  如下:

$$G_1(j\omega) = e^{-j\omega L}$$

$$G_2(j\omega) = \frac{K}{1+j\omega T}$$

$$\text{所以, } G(j\omega) = \frac{K e^{-j\omega L}}{1+j\omega T}$$

描绘波德图时, 假定  $G_1(j\omega)$  的相位为  $\varphi_1$ ,  $G_2(j\omega)$  的增益为  $g_2$ , 相位为  $\varphi_2$ , 那么增益特性和相位特性可用它们各自之和求出:

$$g = g_2$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

为了求出它们各自之和, 要在半对数方格纸上描绘出每个波德图, 然后把它们相加起来就可以了。

# 16 控制的特性

□ 要 点

对被控对象给予控制动作(修正动作)时,在时间上有连续的和  
不连续的两种。在连续控制动作中有比例动作(P动作)、积分  
动作(I动作)和微分动作(D动作)等。在不连续动作中如电暖炉,  
在设定的温度附近通过开关的通断来进行控制。

□ 解 释 ● 连续控制的动作

控制装置如图 7.49 所示时,在控制偏差和操作量之间,有如  
下的关系:

$$y=\frac{G}{1+GH}z$$

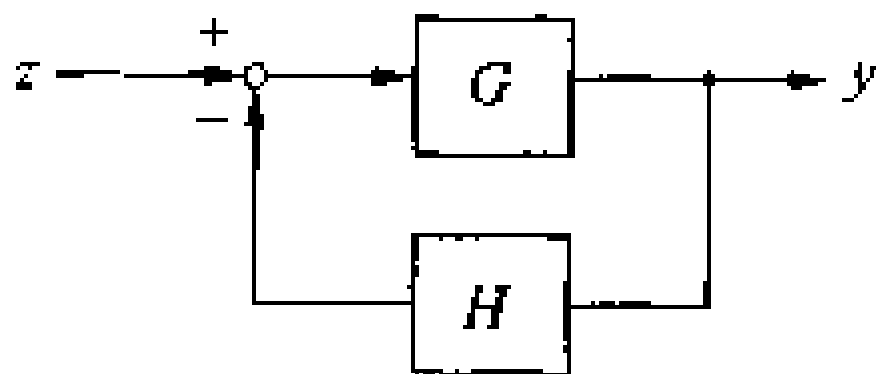


图 7.49 控制装置

因为一般情况下  $G \gg 1$ ,所以操作量  $y$  可表示如下:

$$y=\frac{1}{H}z$$

当上式中  $H$  是常数时,令  $K_p=1/H$ ,那么,这个  $K_p$  就是比例  
值,这时的操作量  $y$  可表示成下式:

$$y=K_p \cdot z$$

P 动作

把表示与控制动作信号  $z$  成比例的操作量的式称为 P 动作。  
图 7.50 给出了 P 动作的阶跃响应。像从图晓得那样,一增大  $K_p$   
就渐渐变成振荡,这时虽然稳态偏差减少了,可是它达不到 0,因  
此,在偏差产生期间,加入积分动作的 I 动作使之成为 PI 动作就  
可以了。表示 PI 动作的公式如下:

PI 动作

$$y=K_p\left(z+\frac{1}{T_i}\int zdt\right),T_i\text{ 为积分时间。}$$

加入 I 动作后的阶跃响应,如图 7.51(b)所示,稳态误差逐渐  
减到 0,可是响应时间拉长了。

快速性

PID 动作

为了缩短响应时间(叫快速性),再加入对输入变化可产生迅  
速响应的 D 动作,使之成为 PID 动作就可以了。PID 动作的公式

如下：

$$y = K_p \left( z + \frac{1}{T_i} \int z dt + T_D \frac{dz}{dt} \right), T_D \text{ 为微分时间。}$$

希望 PID 动作的阶跃响应能像图 7.52 那样的形状。

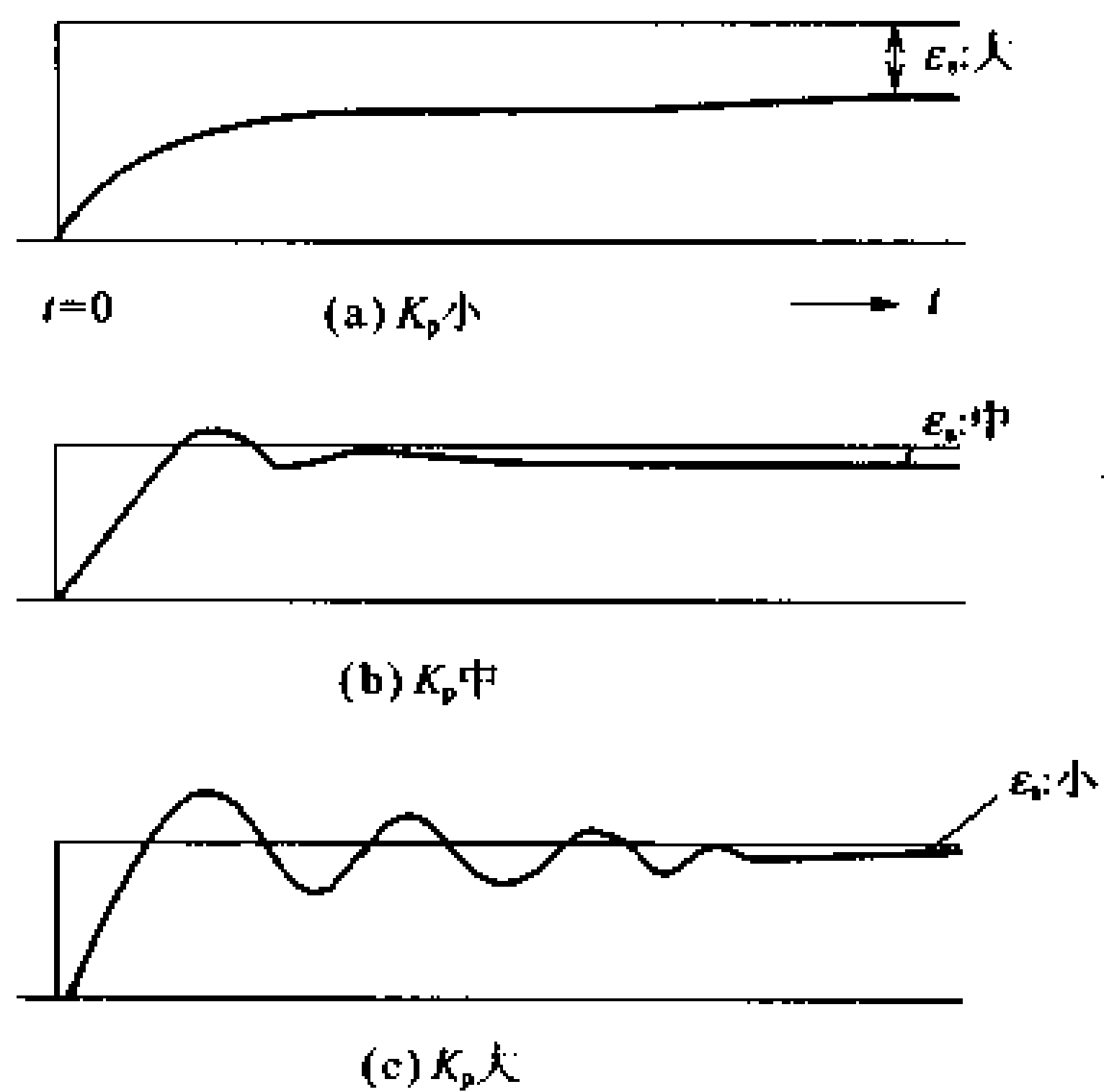


图 7.50 比例增益和稳态偏差

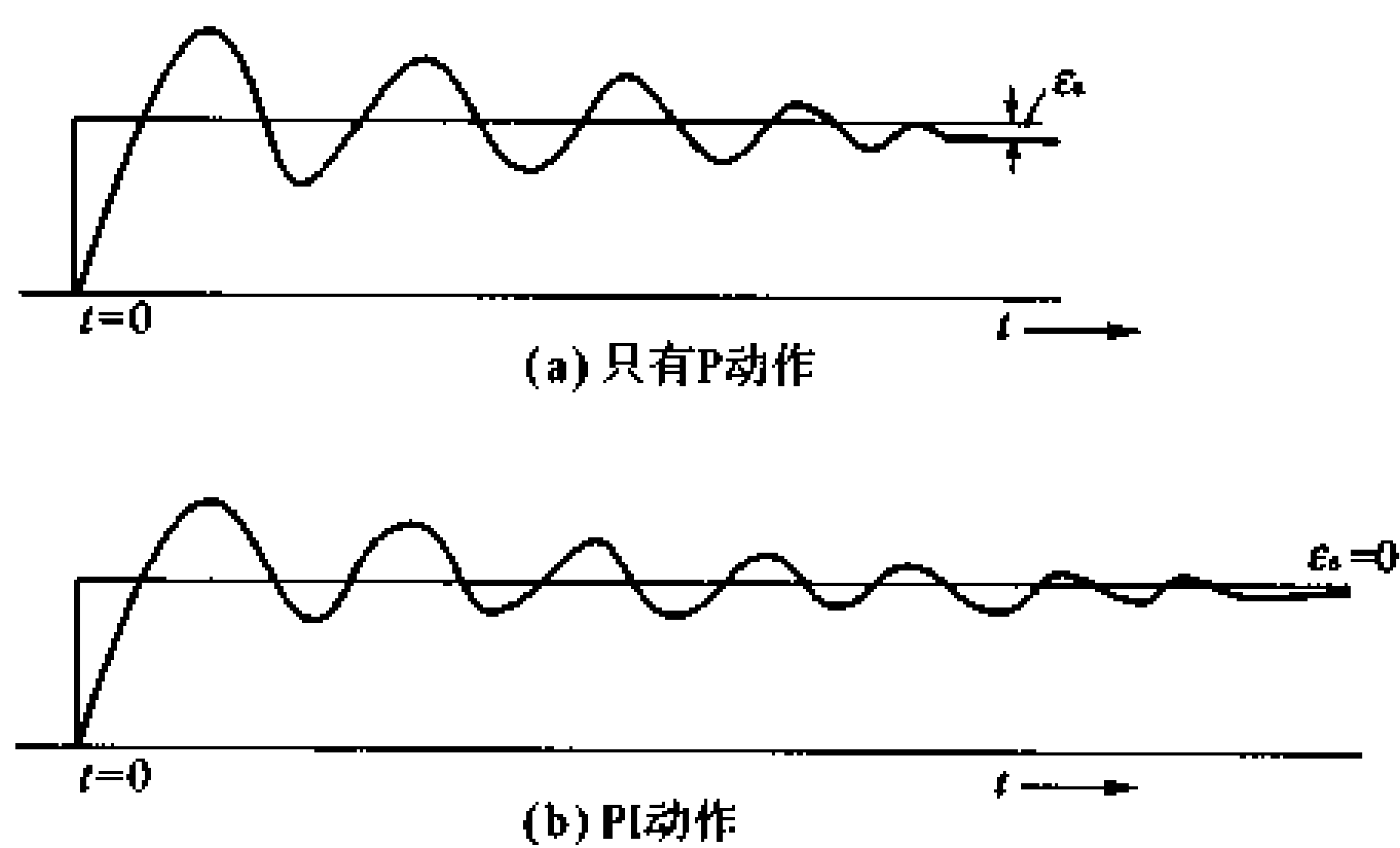


图 7.51 P 和 PI 动作的比较

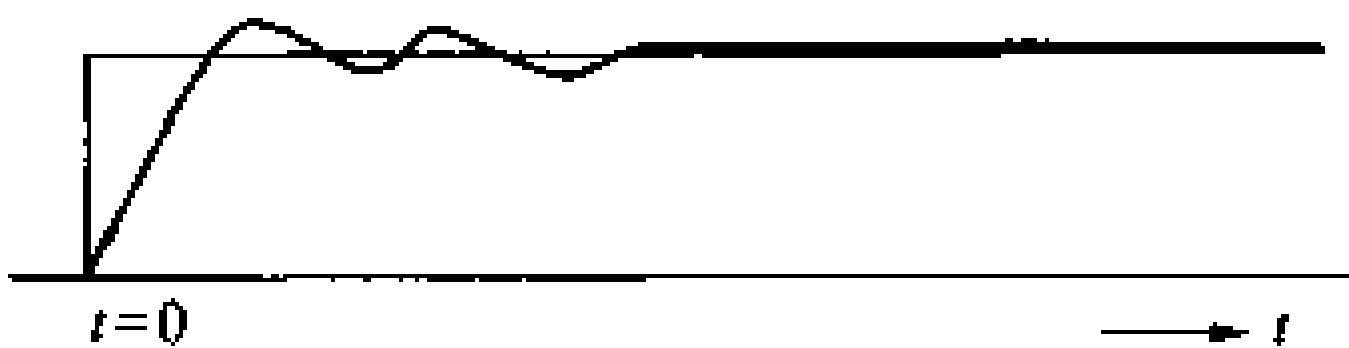


图 7.52 PID 动作的阶跃响应

● 不连续动作

周期性振荡

ON-OFF 动作也可以叫作二位式动作。这种动作即使目标值一定,被控量也在目标值上上下下变动,不可能一直保持一个定值。称这种状态为周期性振荡(cycling)。实际情况如图 7.53 所示,被控量比开关的 ON-OFF 来得慢,所以这种不连续动作多使用在像电暖炉那样精度要求不高的控制中。

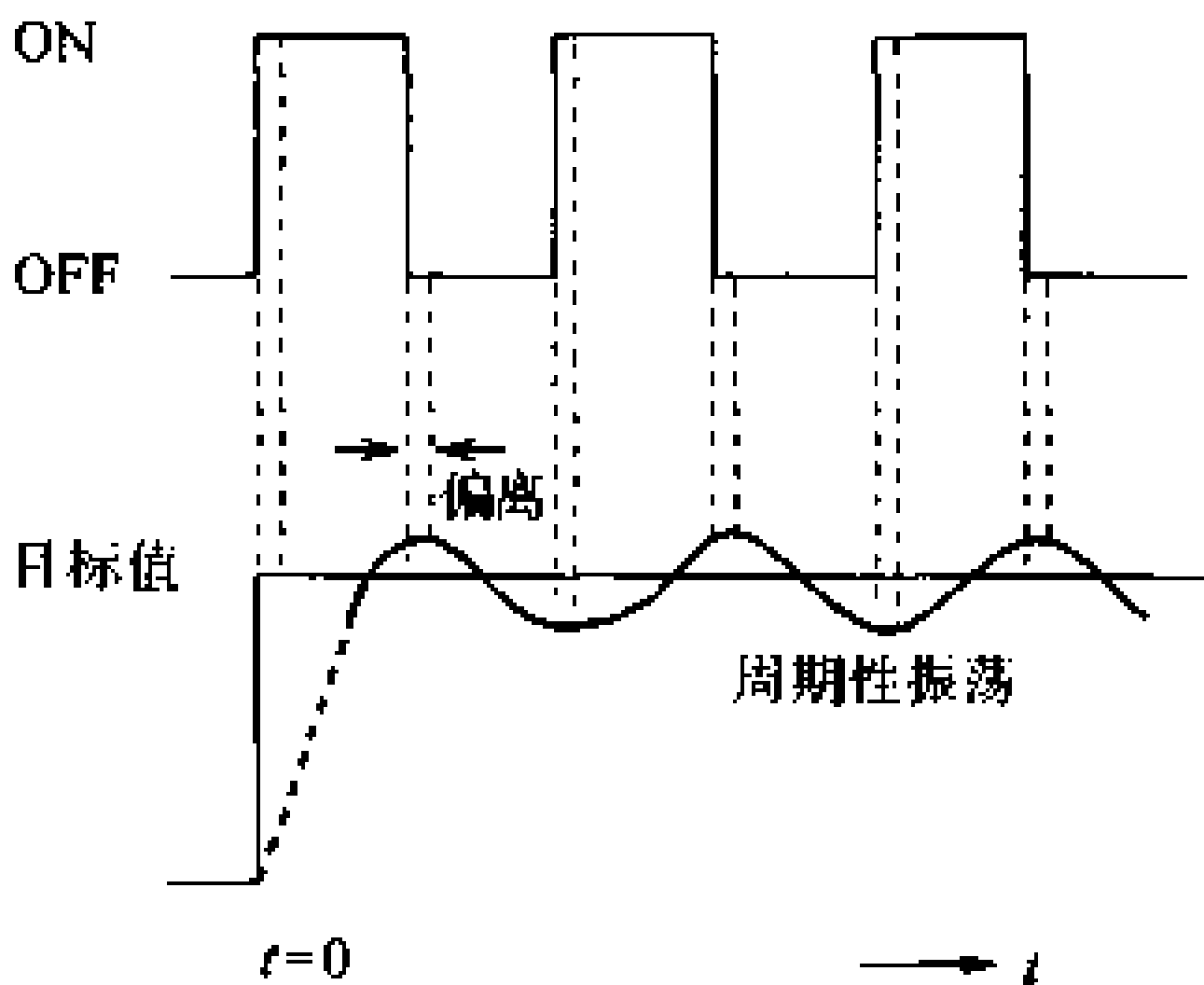


图 7.53 二位式动作的原理

□ 相关知识 ● 稳态误差

将开环频率传递函数用  $G(j\omega)$  表示时,它的稳态误差  $\epsilon_s$ ,可表示成

$$\epsilon_s = \frac{1}{1+G(j\omega)} v_s = \frac{1}{1+K_p} v_s$$

如果  $\omega=0$  时的开环频率传递函数值为  $K_p$ 。从上式可知,如果在开环频率传递数中含有积分环节,那么,因为在  $\omega=0$  时,  $G(0)=\infty$ ,所以不产生稳态误差。



## 17 响应的改善

### □ 要点

好的响应指标是控制系统稳定、响应速度快和稳态特性好。但是这些指标之间有矛盾。因此,为了得到好的响应,在控制系统中应以满足主要要求加以改进。

### □ 解释 ● 稳定性判别法

稳定性判别法有许多种。这里,只对奈奎斯特(Nyquist)稳定性判别法和根据波德图的判别法加以说明。

#### ① 奈奎斯特的稳定性判别法

将开环频率传递函数的矢量轨迹,像图 7.54(a)所示那样描绘在复数平面上。如果轨迹通过实轴上的 Q 点( $-1, j0$ )的右侧,控制是稳定的,而轨迹通过 Q 点的左侧,控制是不稳定的。如果轨迹通过 Q 点上,那么 Q 点就应该是稳定临界点(即稳定和不稳定的分界点)。这一判别法就是奈奎斯特稳定判别法。和阶跃响应(b)相对应的,分别是图 7.54 的曲线①和①',②和②',③和③'。

奈奎斯特稳定  
判别法

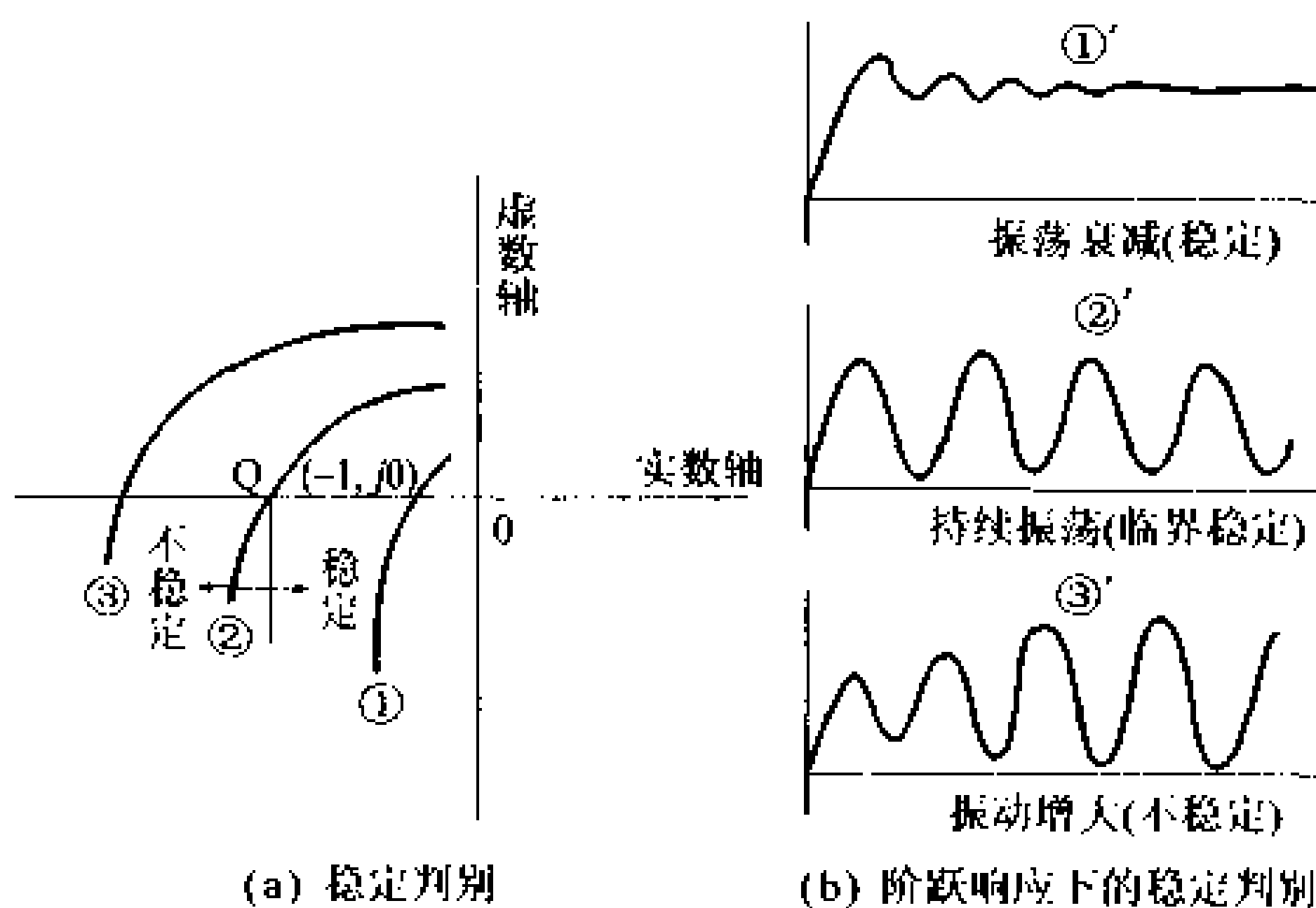


图 7.54 奈奎斯特图和阶跃响应

增益裕度法  
相位裕度法

尽管控制系统是稳定的,可是要知道它的稳定程度如何?其方法有增益裕度法(gain margin)和相位裕度法(phase margin)两种。图 7.55 是为了求以上裕度的奈奎斯特图。如果矢量轨迹和实轴的交点为 P,那么,增益裕度  $g_m$  (dB)可由下式求出。

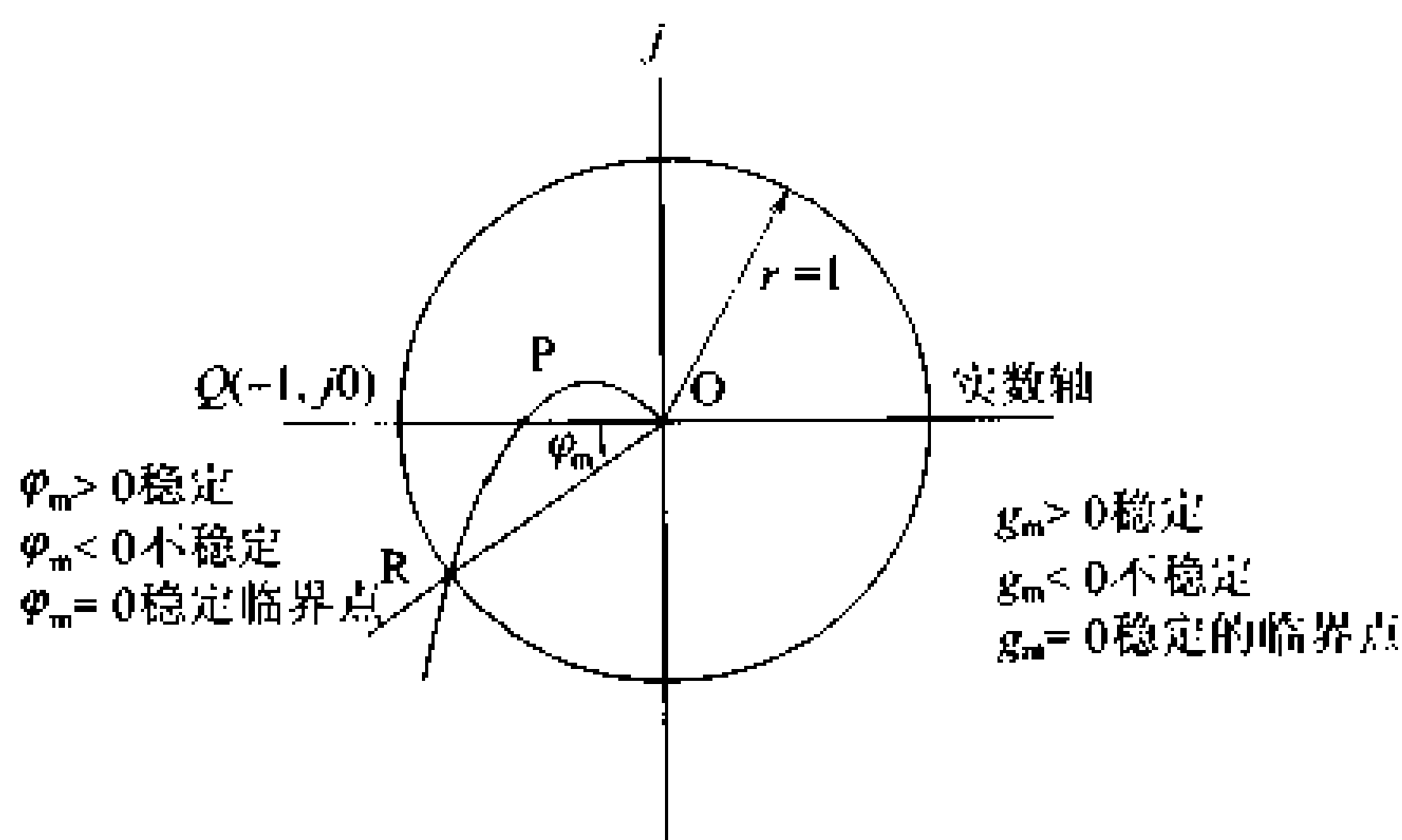


图 7.55 增益裕度和相位裕度

$$g_m = 20 \lg \frac{OQ}{OP} = 20 \lg \frac{1}{OP} = -20 \lg(OP)$$

$g_m > 0$  时, 控制稳定,  $g_m < 0$  时, 不稳定,  $g_m = 0$ , 是稳定临界点, 如果矢量轨迹和半径为 1 的圆的交点为 R, 那么, 相位裕度  $\varphi_m$  为  $\angle ROQ$ 。

如果减少增益裕度和相位裕度, 控制系统就临近不稳定, 如果增大, 响应就变得迟缓, 就不能得到快速响应。因此, 在实际当中是用和补偿电路相组合的方法来谋求衰减性和快速性的改善。

## ② 波德图的判别法

反馈控制系统中, 当开环频率传递函数比 1 小时, 控制是稳定的。也就是说, 开环频率传递函数的相位  $\varphi$  是  $-180^\circ$ , 增益  $g$  小于 0dB 的, 控制是稳定的, 以此为基准, 在图表纸上描绘波德图, 就得到图 7.56。图中的 0 点叫增益交越点, OP 叫相位裕度, OR 叫增益裕度, 于是, 以 0dB 和  $-180^\circ$  的线为基准, OP 处在上面的或者 QR 处在下边的, 控制系统是稳定的, 与此相反时, 是不稳定的, 0 点和 Q 点重叠时是稳定临界点。

因为图 7.56 相位裕度过大, 所以在这种情况下, 用加入补偿电路等把增益特性曲线往上移, 从而减少相位裕度就可以啦。

一般情况下, 相位裕度在伺服机构中取  $40^\circ \sim 65^\circ$ , 在过程控制中取  $20^\circ \sim 50^\circ$  比较合适。

从图 7.56 的伺服系统波德图来看一下把相位裕度调到  $45^\circ$  时的方法。(在伺服系统中, 好的响应标准相位裕度, 一般是  $45^\circ$  左右)。像从图 7.56 可知, 为了把相位裕度调到  $45^\circ$ , 把增益特性曲线  $g$  拉高 10dB, 到达  $g'$  就可以了。求这 10dB 的增益, 其结果如下:

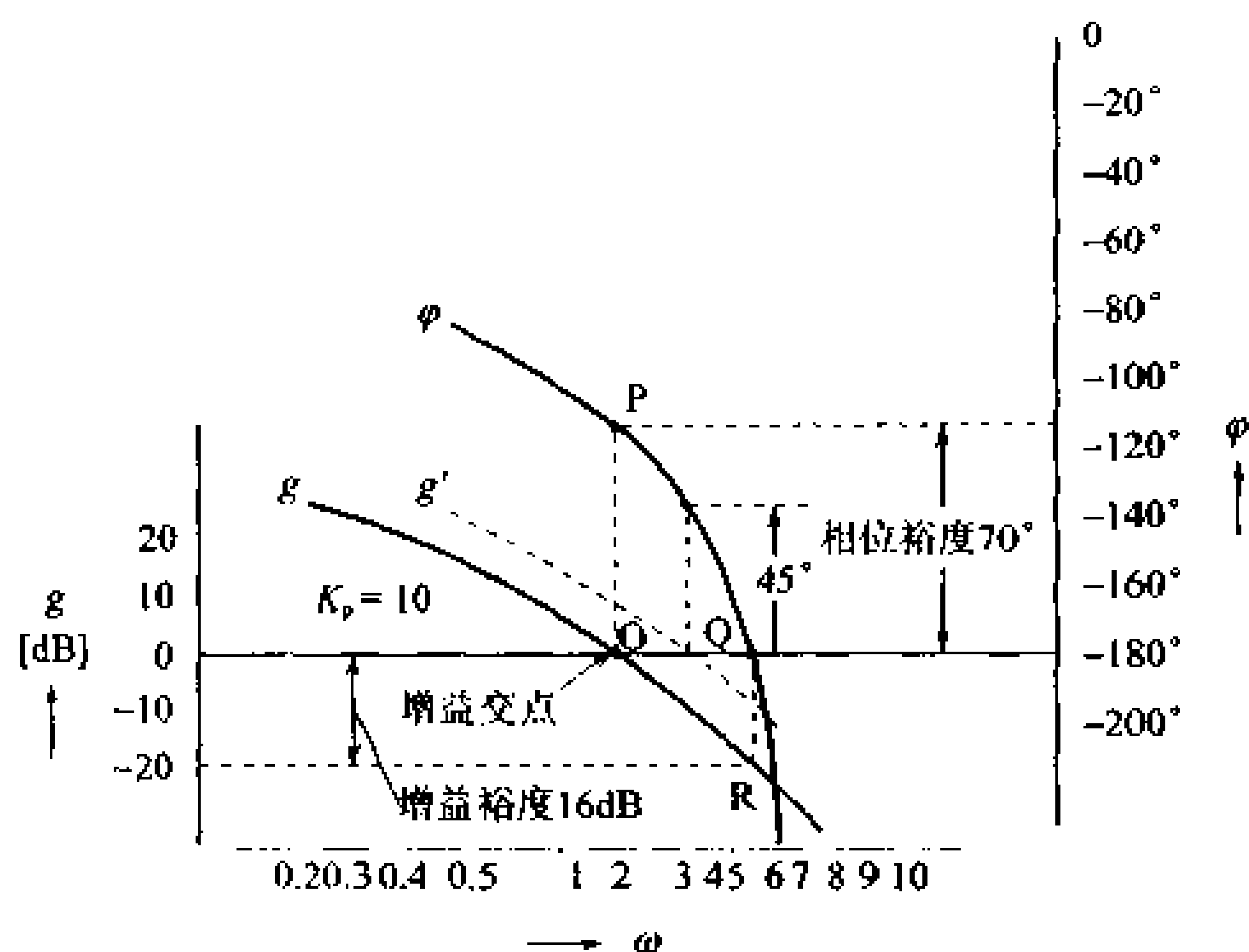


图 7.56 根据波德图的稳定判别法

$$20 \lg K = 10$$

$$\lg K = \frac{10}{20} = 0.5$$

所以,  $K = 3.16$

为了把增益特性曲线往上拉,在  $g$  的  $K_p$  上再乘上上面求到的  $K$  值即可。因此,新的  $K_p'$  值如下:

$$K_p' = K_p \times K = 10 \times 3.16 = 31.6$$

与此相对应,降低增益特性曲线时,用  $K$  除以  $K_p$  就可以了。

## 18 计算机控制

### □ 要 点

计算机控制从家庭所使用的空调、冰箱和电子炊具到铁道运输管理那样的全国规模的系统控制,是各种各样的。基本上是用微处理机判断来自传感器输入,并对被控对象进行控制。

### □ 解 释 ● 计算机控制的功能

图 7.57 是计算机控制的概要。在相互连接上使用了各种接口,在控制对象上安装了传感器,计算机从传感器上读取数据,经过综合判断后进行控制。控制的状态随被控对象的种类不同而不同。如控制电子炊具等用 4 比特微处理机就足够了。可是像铁道运行管理的控制,那就需要大型计算机。

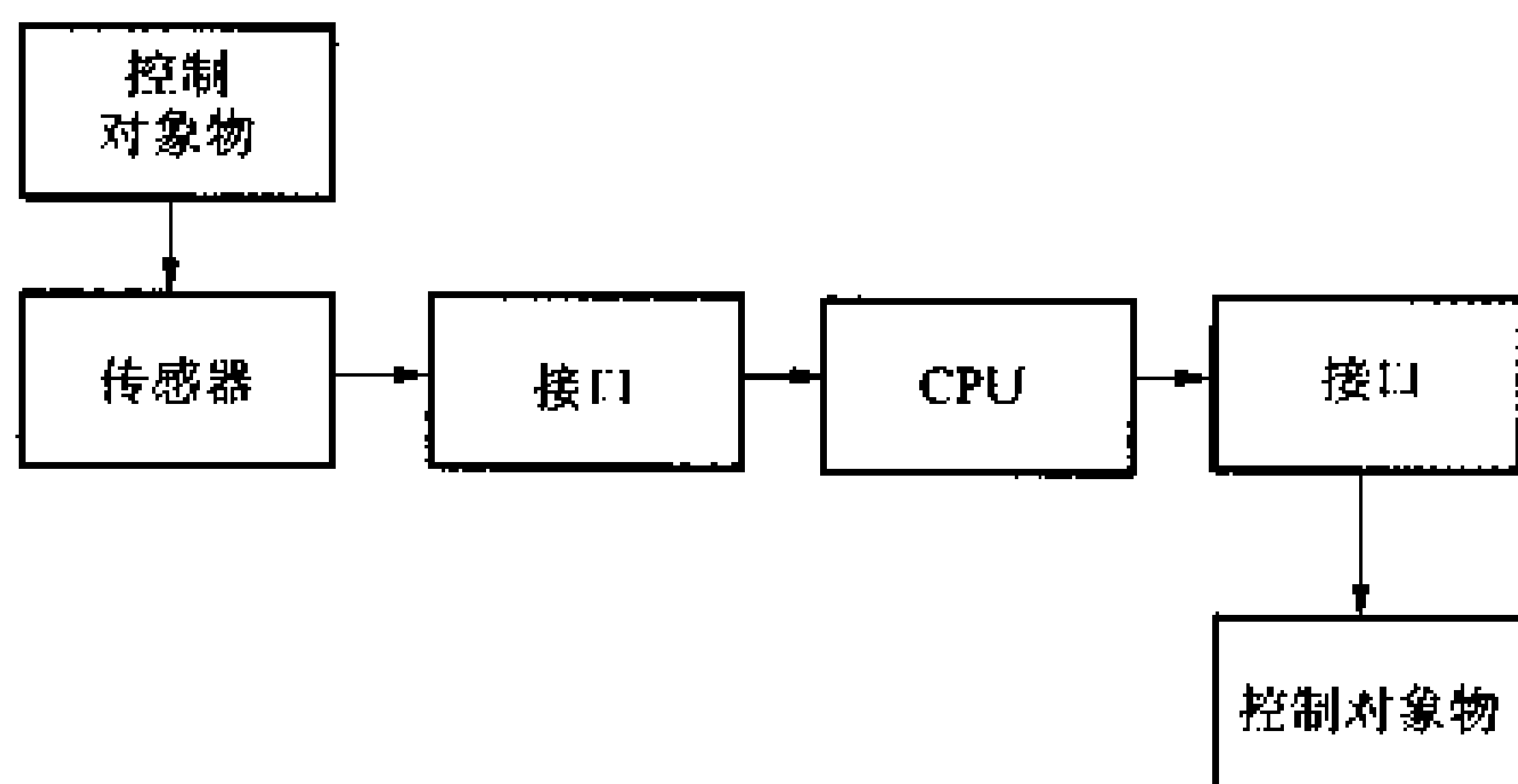


图 7.57 控制的概要

图 7.58 是电子炊具等简单的控制。对来自传感器输入进行反复判断是这种控制最基本的控制。所以使用简单的程序和 4 比特微处理机进行控制就足够了。但是即使像这样简单的控制,其控制动作也都要根据程序进行,所以,在计算机控制里一定要有硬件和软件。

另一方面,如果要求进行复杂的处理和高速处理,那就要用 8 比特以上的微处理机。这时由于硬件也是大型的,控制用的程序也变大了,所以,存储器也要相当大。

最近,控制机构也变得越来越复杂了。从处理速度到复杂的动作,都对计算机提出了许多要求,采用了微型计算机到超大型计算机。另外请注意,目前大规模的控制系统也正在向分散化处理

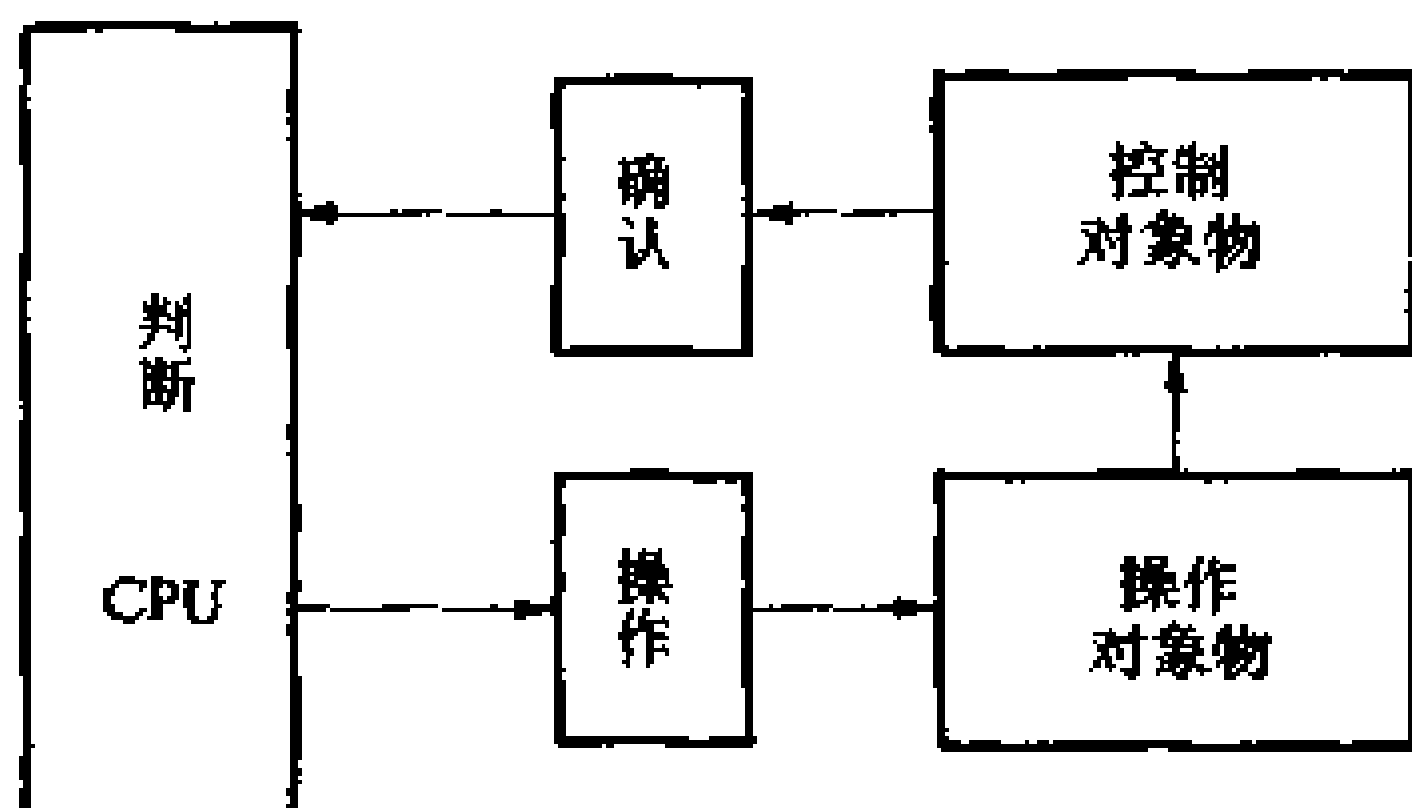


图 7.58 简单的控制例

的方向发展。

在用这些计算机控制时,如从经济上来考虑,需要注意到硬件所占的费用和软件所占的费用,这对与此密切相关的设计与制造是很重要的。

## □ 相关知识 ● 计算机控制

作为实用化的计算机控制,大规模控制中有铁道的自动运行系统和工厂的无人仓库管理系统以及生产管理系统等。计算机控制在企业和学校,以及围绕我们的日常生活当中都已得到应用。现在大家都很明确,计算机控制今后会越来越广泛。

一般来说,像家电产品那样大量生产中,主要问题是要在减少使用元器件的数量上,狠下功夫。这就要求尽可能简化控制方法,将程序编成简单的结构,语言上也尽可能利用汇编程序(机器语言),一般采用4比特微处理机就可以了。但是,生产数量少和需要复杂的控制时,由于要用高级语言进行程序开发,结果,程序主体变大了,小型微处理机就不够用了。因此,就有应用元器件数量增多和价格上涨等问题。

# 19 接口

## □ 要点

为了把计算机和外部设备连接起来,这就需要接口部件。接口如上一节的图 7.57 所示,它被用于计算机主机(CPU)和外部设备之间。

## □ 解释

### ● 接口的种类

在个人计算机主机的外围附有各种插口,这些插口和计算机(CPU)之间要用各种接口。

#### 键盘接口

键盘接口是连接键盘和 CPU 之间的部件。是计算机直接读取来自键盘输入的中间部件。它有图 7.59 所示的并行接口和让键盘内具有 CPU 串行接口两种。

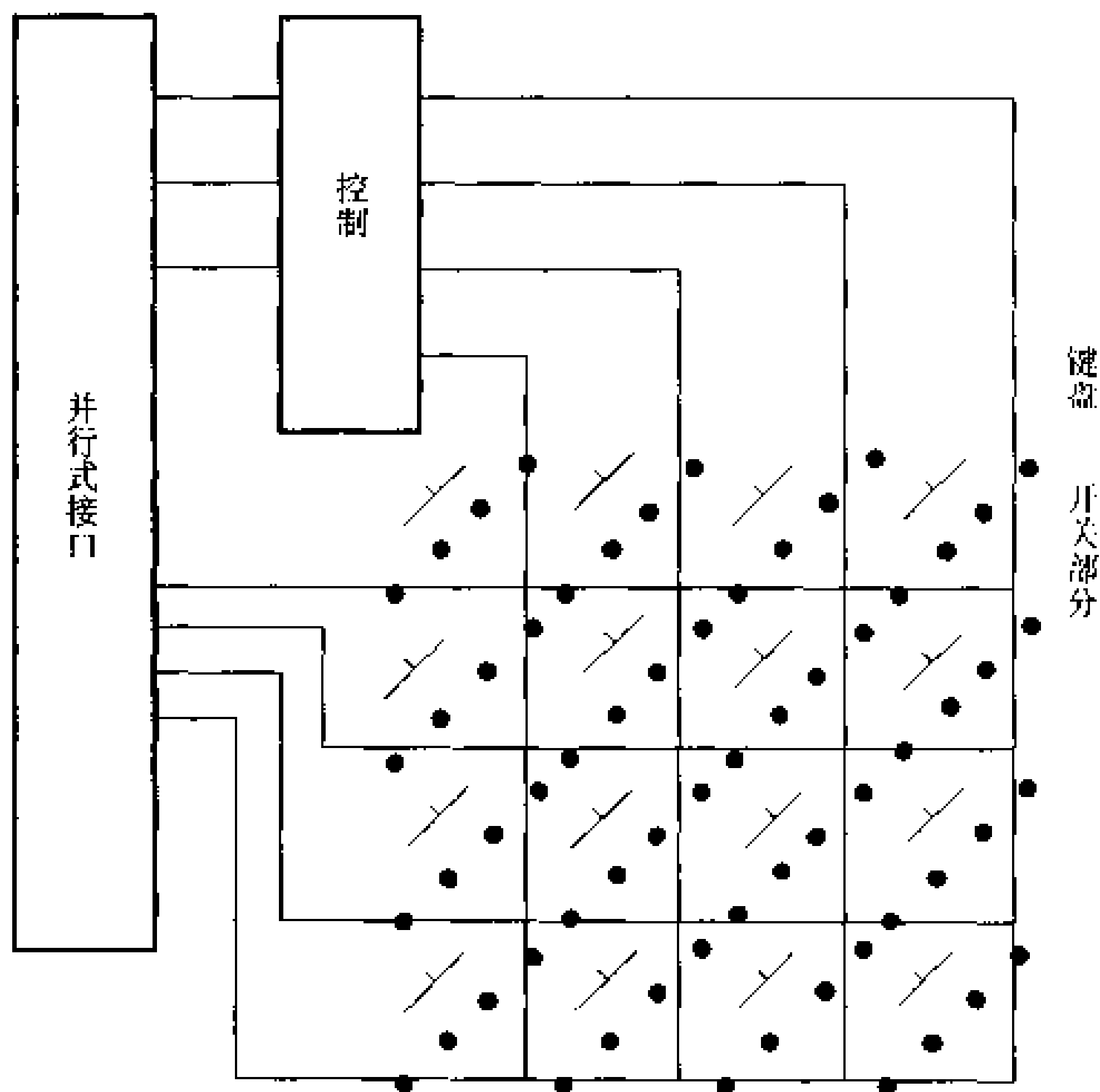


图 7.59 并行式接口

#### CRT 接口

CRT 接口如图 7.60 所示,它具有被叫作 VRAM 的主机 CPU 与 CRT 接口共有的存储器。并将其内容显示在显示器上。

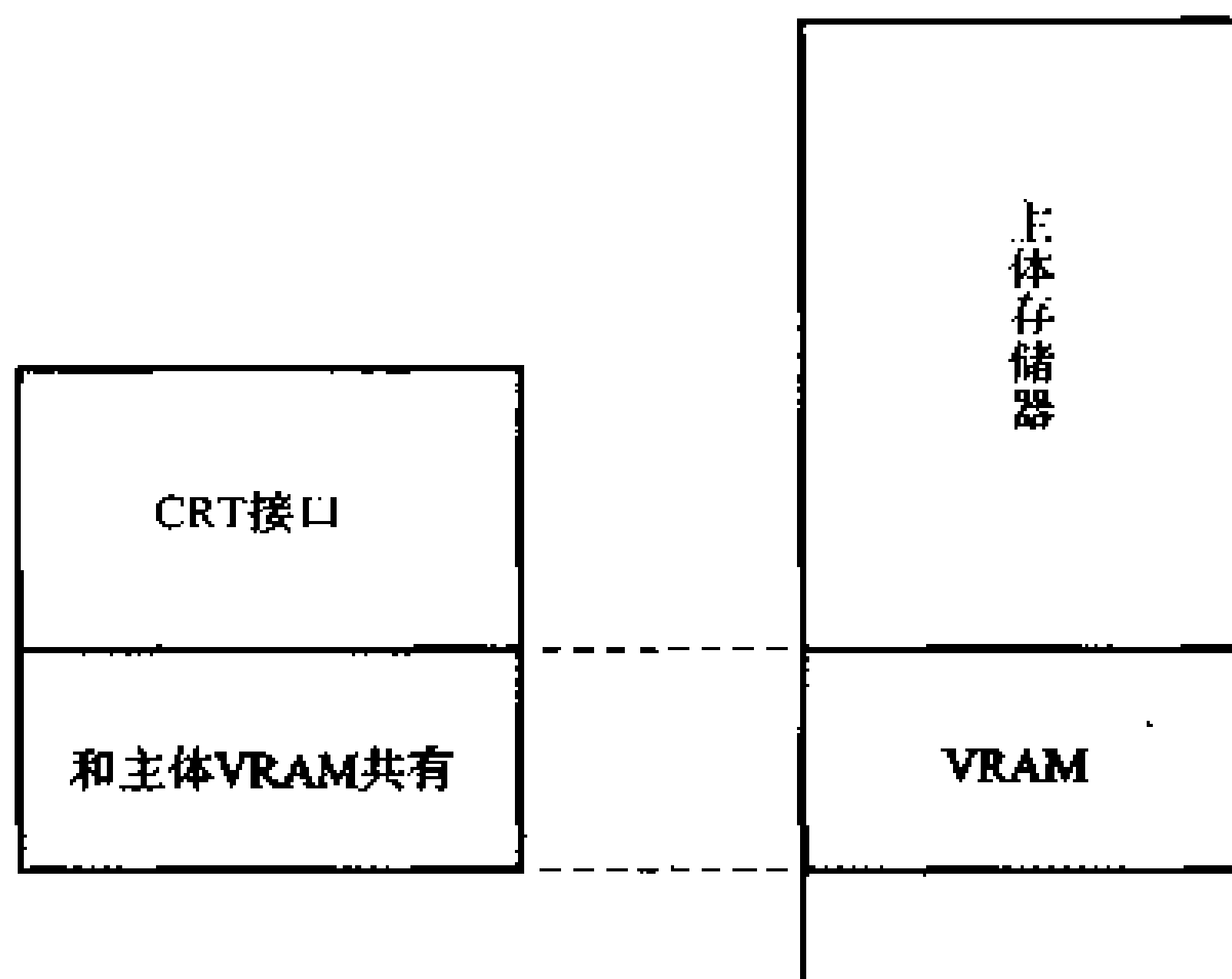


图 7.60 CRT 接口

表 7.4 磁盘接口的种类

FD 接口	随大小 8 英寸、5 英寸、3.5 英寸等和容量 2DD、2HD 不同而不同
HD 接口 SASI 类型 SCSI 类型 IDE 类型	用于固定磁盘(磁式和光等)的接口,根据数据传输和多个并、串行连接的不同有各种类型的接口。其主流是日本产的 SCLS。

### 磁盘接口

磁盘接口是为了连接软盘和硬盘的接口。它的种类如表 7.4 所示。

SCSI(Small Computer System Interference)是从个人计算机到超大型计算机都能使用的接口。

### 高速并行接口

高速并行接口,被用在图像扫描仪等上。

另外,其它接口还有:RS232C 接口用于鼠标和通信接口等;GP-IB 接口,用于测量控制;以及被用于开关的 ON-OFF 的并行接口等。

# 20 外部设备的连接

**要 点** 为了连接计算机和控制对象，必须充分考虑到接口的特性以及控制对象的规格。

**解 释** ● 接口和外部设备的连接

接口和外部设备的连接是 1 对 1 进行的。但是，根据接口特性的不同，也有在一个插口上串行数台设备的情况，所以利用时必须注意这一情况。

① 1 对 1 连接的接口

如键盘、CRT、鼠标、RS232C 和打印机接口那样，最普通的使用是用专用的电缆从插口连接到各设备的插口上。

② 1 对多个串行的接口

从一个插口串行连接几个设备的接口有 SCSI、GP-IB、MIDI 和 LAN(除 10BASE-T 外)接口等。因为在数据上附有名称，所以，如图 7.61 所示，把设备进行串行连接。

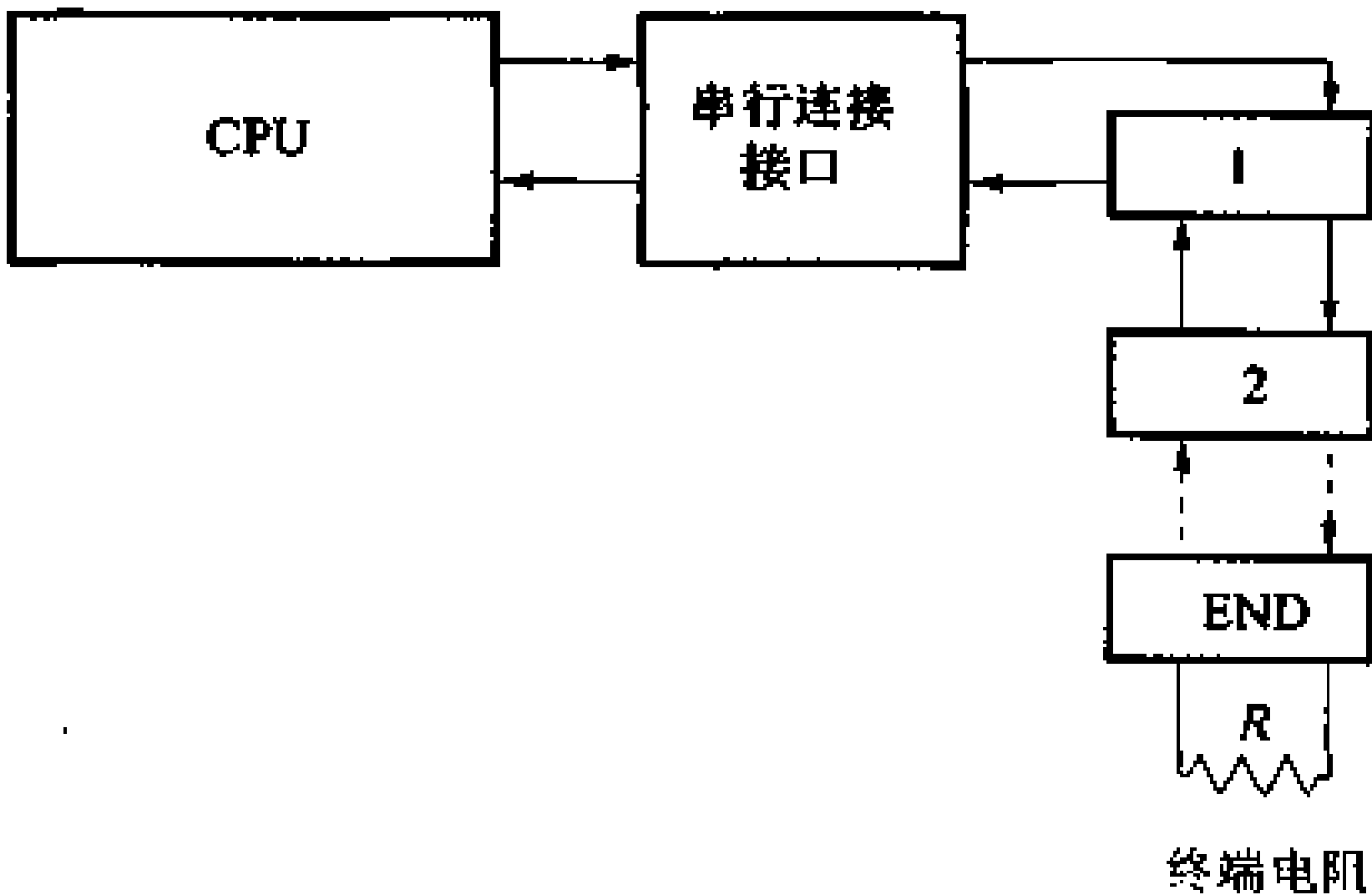


图 7.61 串行连接的接口

**SCSI 接口** SCSI 接口最多能连接 7 台设备。不过各种不同的设备的 ID 必须是相同的。并且要在电缆的终端接上表示终端的终端电阻。此外还要注意使用电缆的总长度是有限制的。

③ 1 对多个并行的接口

如并行接口和中继接口那样，不能从接口板进行 1 对 1 连接



时,可像图 7.62 所示那样,接上一个分线器或转接板,再通过转接板与不同的设备进行连接。

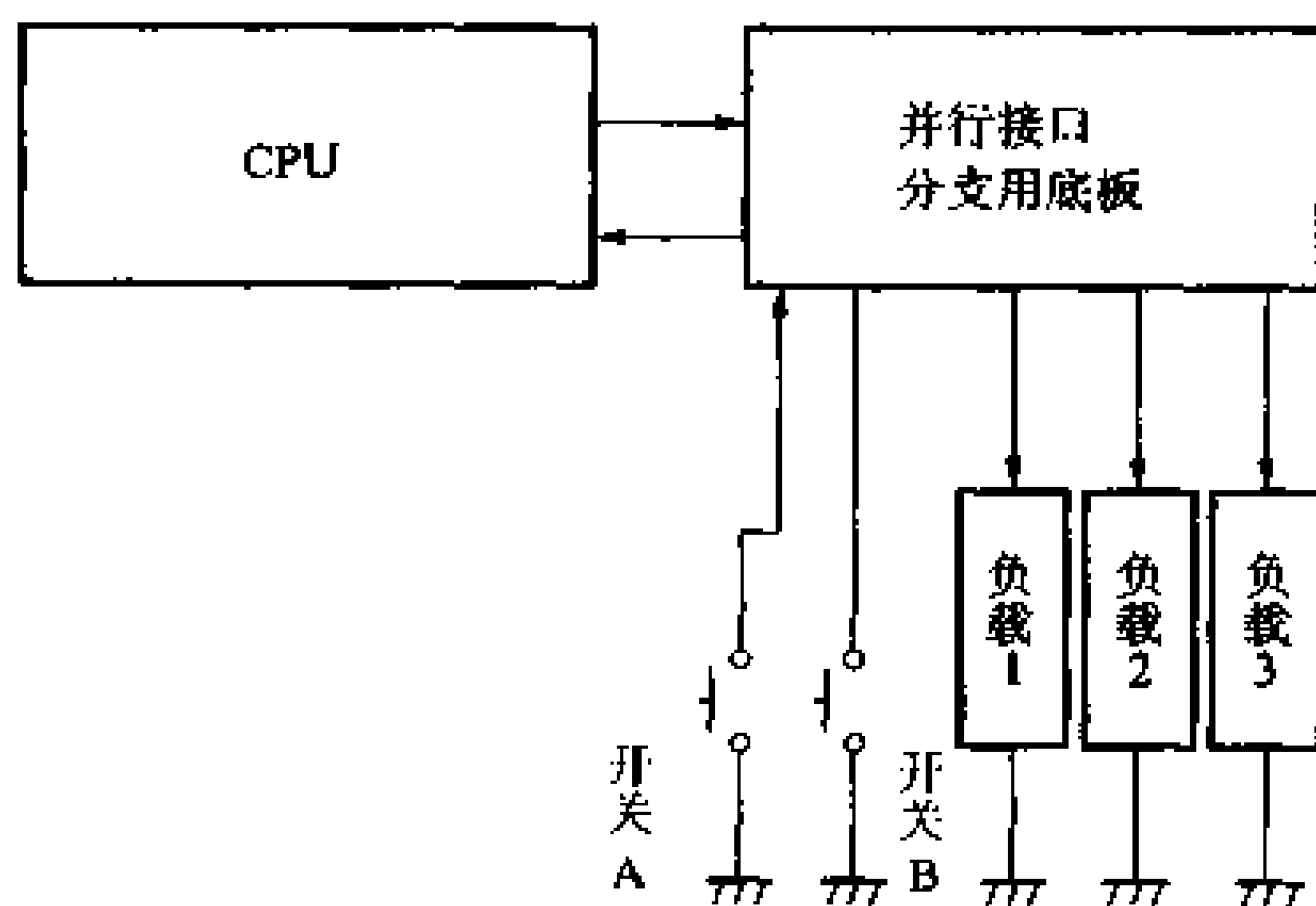


图 7.62 并行连接的接口

## □ 相关知识 ● 和外部设备连接时的注意事项

以前的计算机控制在和外部设备连接时,每一个用途都必须配备一台专用计算机(不能转作其它用,多受用途制约)。可是由于软件的改进和硬件的公开化等原因,现在已经能用一台计算机控制几项工作了。今后更期待着 Windows 方式能进行多任务控制。

如果这样一台计算机和多种设备相组合使用时,那么,必须注意由此所带来的问题。例如,控制使用高压电源的外部机器时,如光耦合器和计算机连接,就需要注意电气绝缘。又如,在汽车等噪声(杂音、干扰信号)多的地方使用外部设备时,不仅仅是输入输出设备,就是计算机主机也必须考虑屏蔽噪声的措施。要想计算机稳定地工作,就需要在它和外部设备连接中,很好注意防噪声干扰的问题。

# 21 机器人控制

## □ 要 点

像在 7.18 节介绍过的“计算机控制”那样,机器人控制也是将接受到的传感器信号经计算机综合判断处理后,来控制机器人的各部的动作。

## □ 解 释

### ● 各种各样的机器人控制

在机器人的控制领域中,日本可以说在世界上是领先的,机器人的种类和性能是千差万别的,人们过去不能做得非常精细的工作甚至是很危险的工作,现在借助机器人都已成为可能了。如果从性能上来分类机器人,可分类如下:

#### 搬运机器人

① 搬运机器人 在向仓库搬入和搬出货物中以及为了机械加工而搬运材料和产品中都使用了搬运机器人。它是用传感器感知埋入地下的起动指向标,使其不离开行走路线而将物品搬运到目的地的。图 7.63 是搬运机器人原理图。

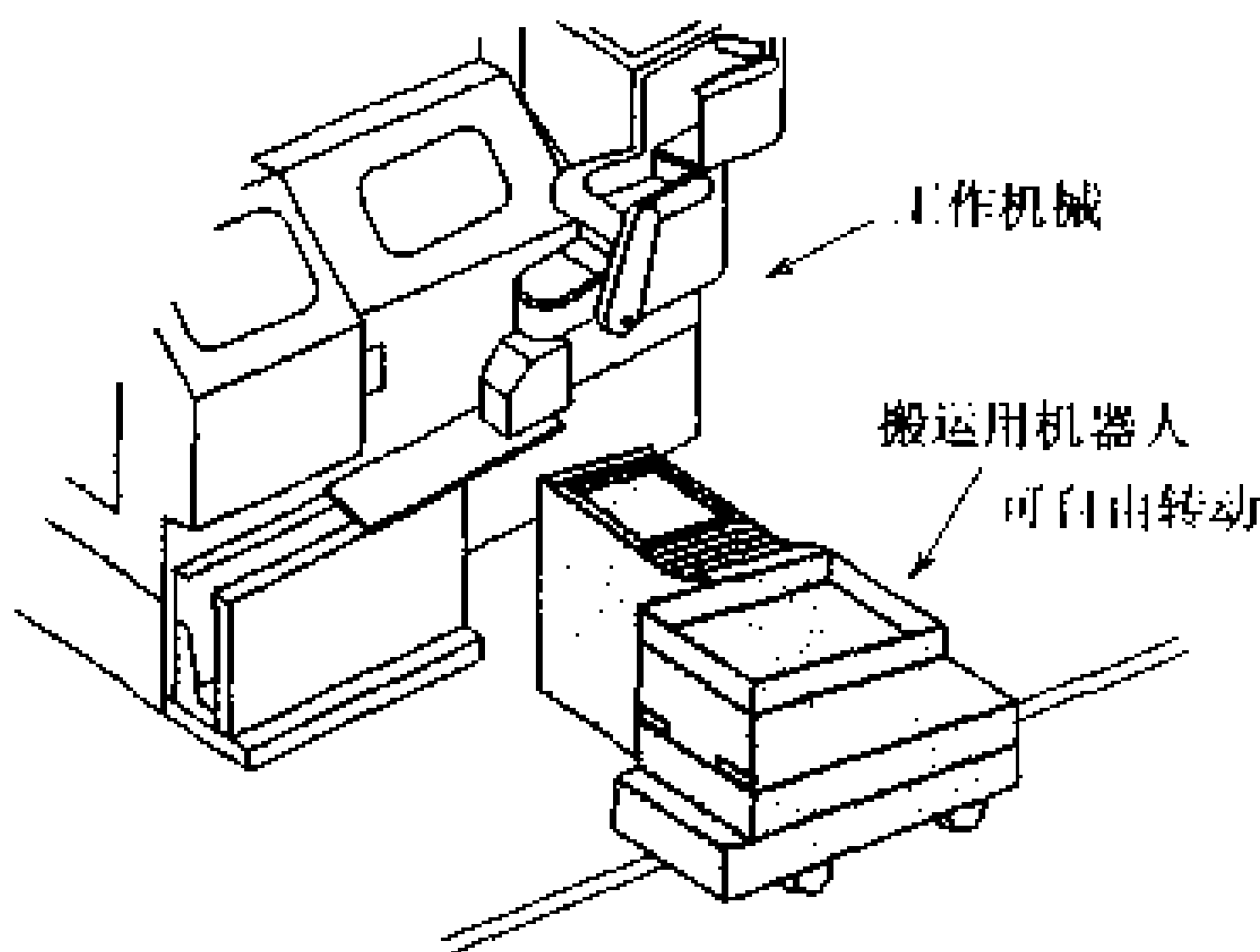


图 7.63 搬运用机器人

#### 摇臂机器人

② 摇臂机器人 它安装了相当于人腕臂等动作的构件,然后再根据安装在腕臂前端的零部件特性来决定其用途。如生产汽车的工厂里,组装、焊接、喷漆等很多工作都使用了机器人,从而使生产实现了自动化。又如加工位置是由机器人摇臂的伸缩和间接的移动来实现的(图 7.64)。

#### 视觉机器人

③ 视觉机器人 其结构多半是把视觉摄像机和摇臂机器人

组装起来实现的。用摄像机检测物体的位置、大小以及颜色等。同时一面进行判断,一面进行指令处理(图 7.65)

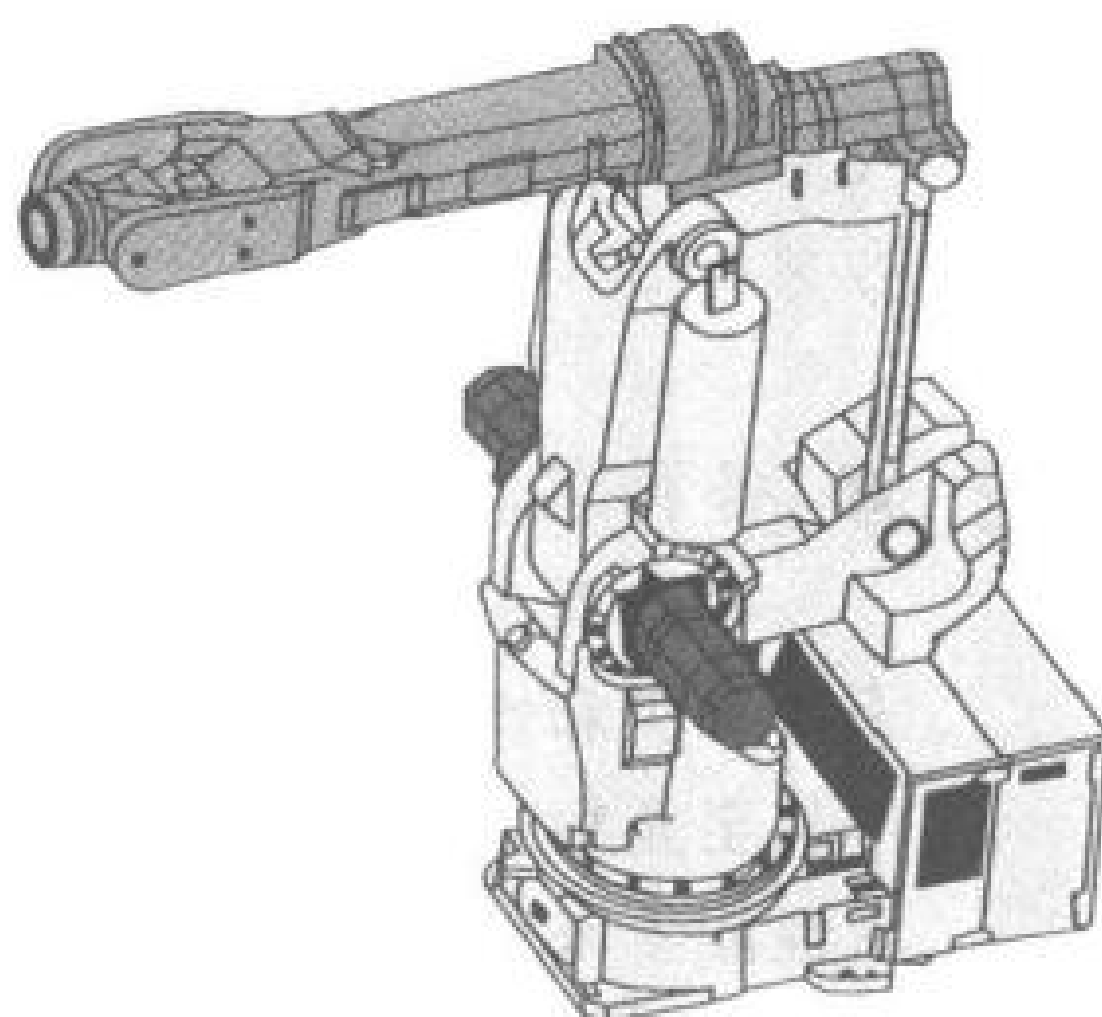


图 7.64 摇臂式机器人

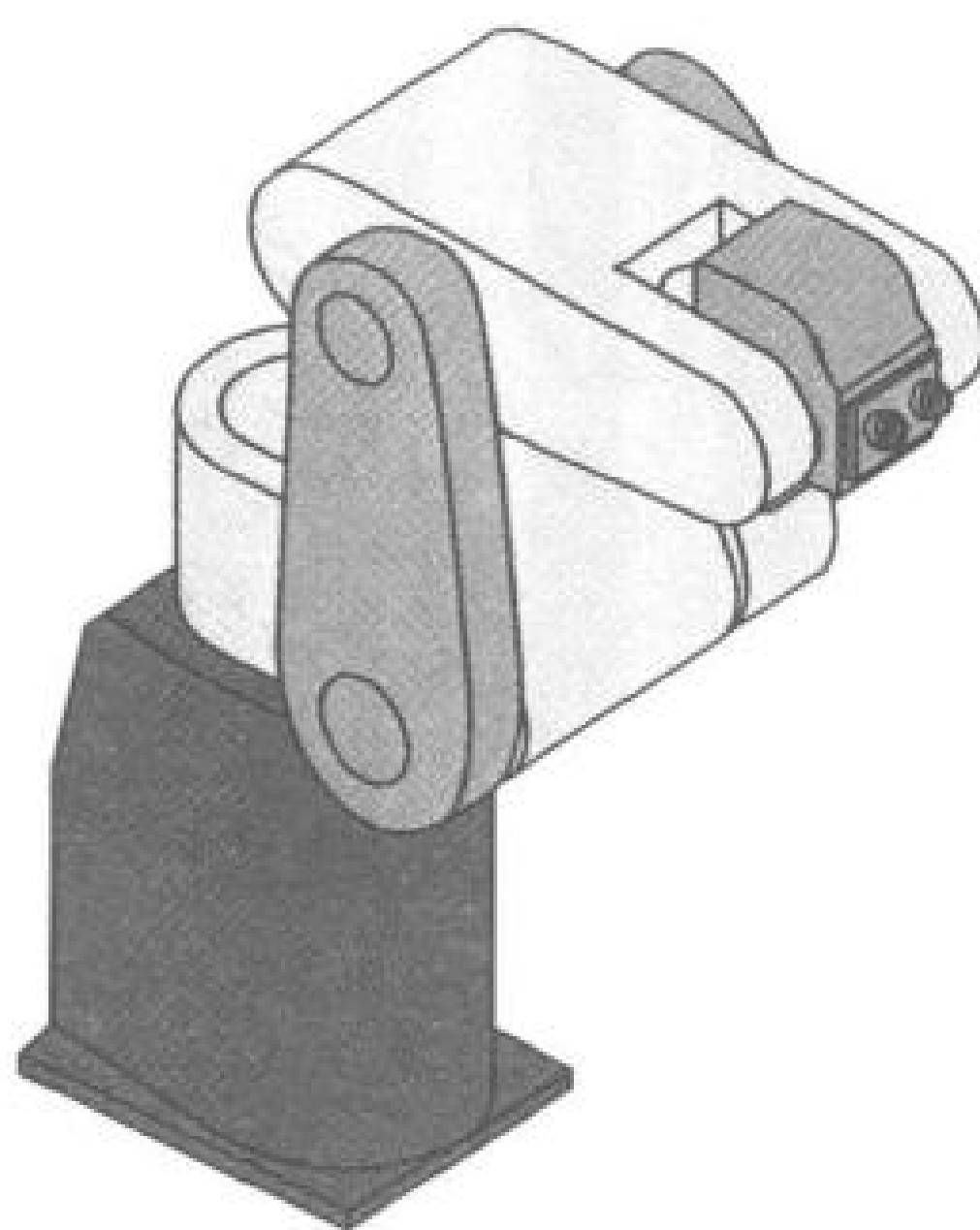


图 7.65 视觉机器人

#### 行走机器人

④ 行走机器人 在现代的电视和电影的世界中,行走机器人是很活跃的。用两只脚一面取得平衡,一面前后行走,但取得这种平衡的控制是很困难的,到今天还没有达到很好的实用阶段。作为用途来说,正期待着它能用于车轮不能行走的地方。

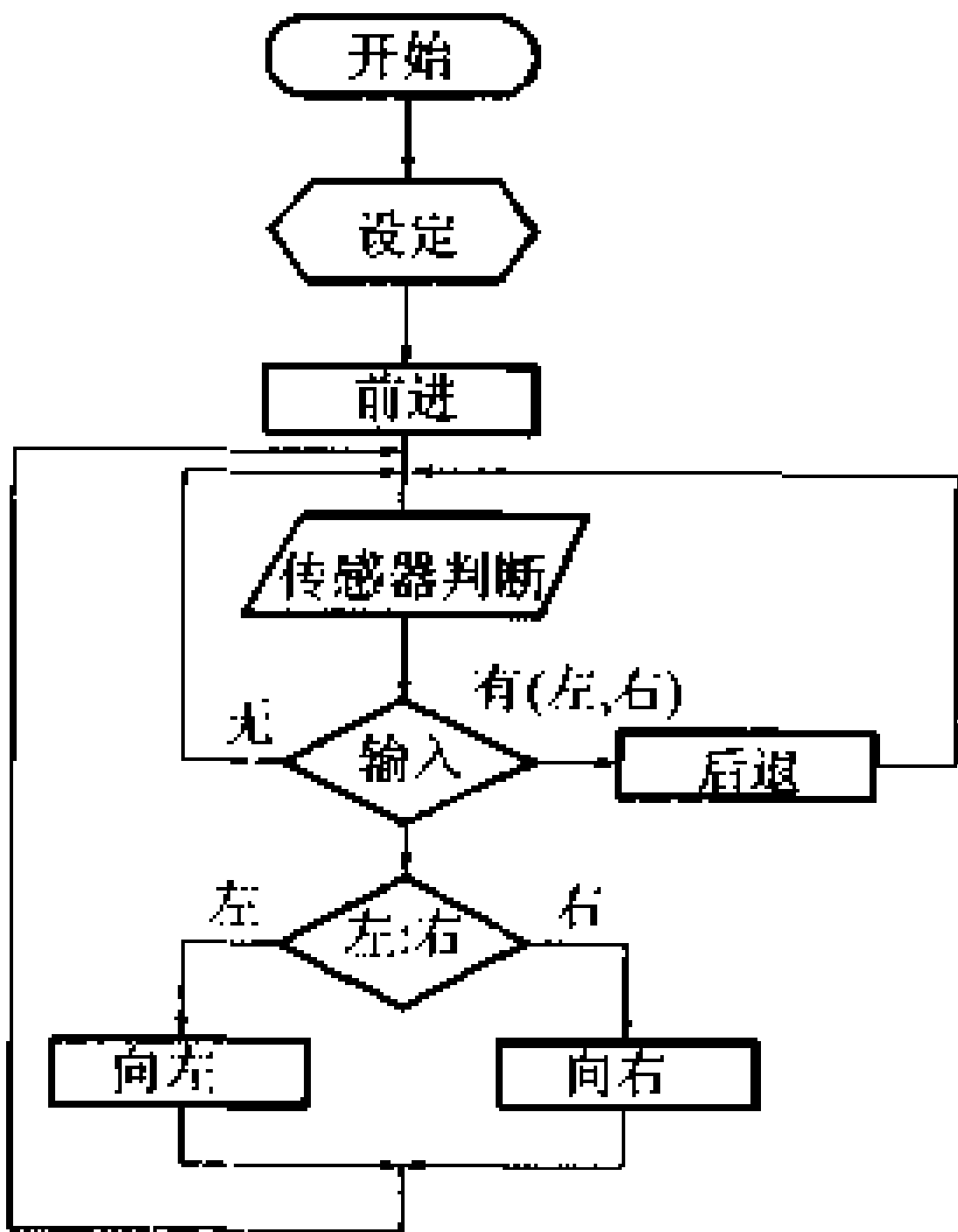
自行走机器人的程序

这里介绍使用 CPU、接口、传感器和电动机等构成的自行走机器人的程序(图(a))。这是一个用传感器感知信息,通过接口,经 CPU 进行数据判断和处理后再送给电动机的简单过程。图(b)给出了流程图,请参考。

```
MAIN:
LD A, STOP
OUT (PC), A
CALL LITTLE
LD A, FORWARD    数据前进
OUT (PC), OUT      数据输出
MAINLOOP:

IN A, (PA)         传感器输入
CPI                位反转
AND MASK           位抹掉
JR Z, MAINLOOP     向MAIN转移
LD B, MASKDATA
IN A, (PA)         再输入
AND B              位抹掉
CP B               传感器校验
JP Z, BACK         有反应则转移
BIT 5, A            右传感器校验
JP MZ, RIGHT       有反应则转移
BIT 1, A            左传感器校验
JP MZ, LEFT        有反应则转移
JP MAIN            向MAIN转移
```

(a) 程序



(b) 流程方块图

图 自行走机器人的程序和流程方块图



## 第8章

# 通信

电信技术起始于1837年莫尔斯(S. Morse, 美国)发明有线电报。此后, 1876年贝尔 (G. Bell, 美国)发明了有线电话, 1899年马可尼(G. Marconi, 意大利)在英法海峡之间实现了无线通信。自那以来, 随着电子技术的发展, 电信技术便迅速发达起来了。

现在, 我们不但可以通过有线通信、无线通信、卫星通信等通信技术随时用电话与国内及世界各国的人们进行交流, 而且通过通信技术与计算机技术的结合实现了语音、文字、图像、数据等的通信。

一方面, 通信技术在不断扩大和发展, 另一方面, 社会的发展和产业结构的变化也对通信业务的多样化和服务优质化提出了更高的要求。

- 责任编委

矶上辰雄

- 执 笔

矶上辰雄(1)

安藤武德(2~6)

山本 诚(7~14)

# 1 电信的原理和系统

## □ 要 点

电信是一种通信方法,它将人们表达意志和思想的语言、文字、音乐、图像等信息,以及计算机之间传送的数据等信息,转换成适合于通信的电信号,并高速传送到远方。

## □ 解 释

### ● 电信系统的基本构成

如图 8.1 所示,发送端先把声音、图像、数据等信息转换成电信号,进而再转换成适合于传输线路传送的电信号或电波,传送给接收端。接收端把收到的信号加以解调,便可重现发送端的声音和图像等信息。

由此可知,电信系统是由发送设备和接收设备组成的。发送设备包括把信息转换成电信号的设备(话筒、摄像机等)和进一步把电信号转换成适合于传输线路传送的信号的设备(调制器、发射机等);接收设备包括把收到的信号转换成电信号的设备(解调器、接收机等)和把电信号转换成信息的设备(喇叭、显示管等)。

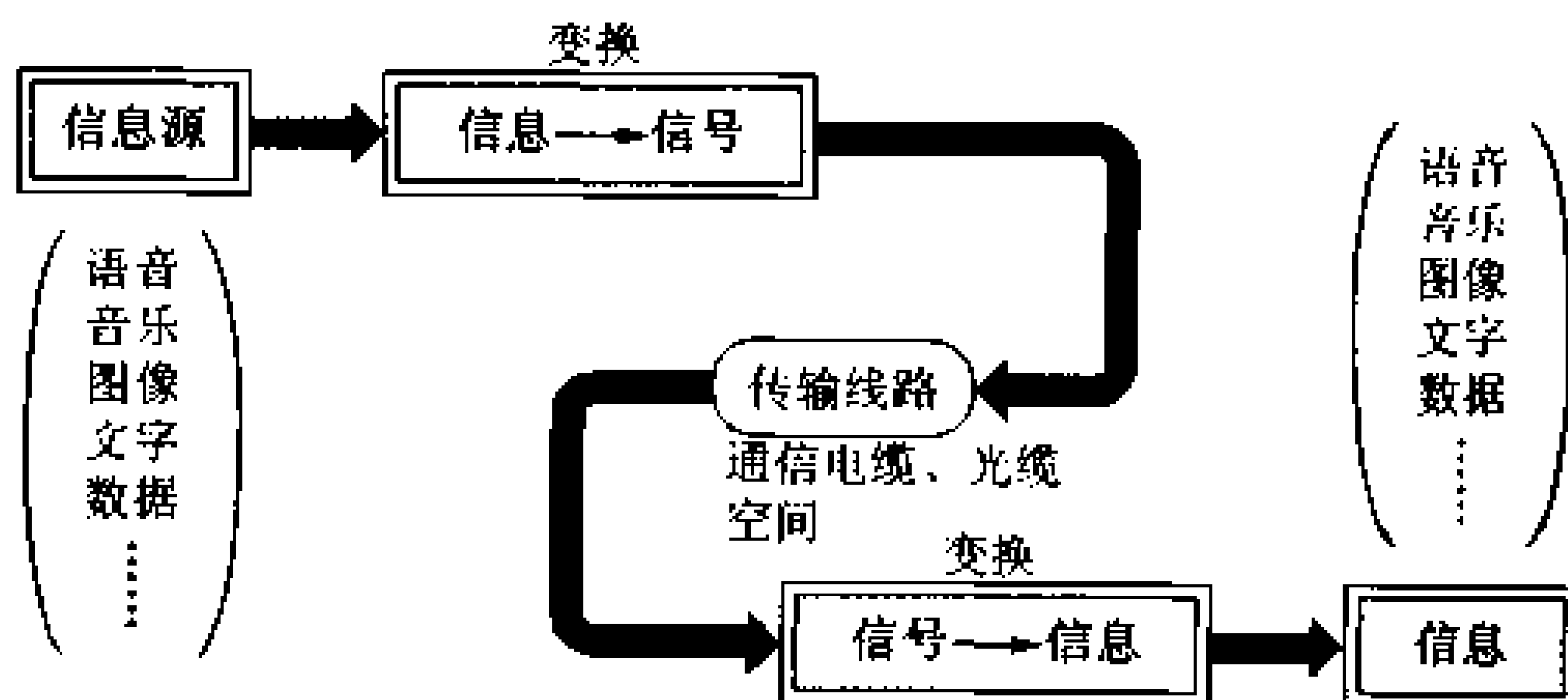


图 8.1 电信系统的基本构成

### ● 有线通信和无线通信的区别及其特点

待传信息转换成适合于传输的电信号、电波或光信号后被送入传输线路。从传输线路的形态来看,采用通信电缆(对称电缆、同轴电缆)或光缆来传送信号的,称为有线通信;以电波的形式经空间传播信号的,称为无线通信。

有线通信中,敷设和维护通信电缆或光缆需要投入相应的费用,但具有失真小、噪声小、受干扰影响小的特点,能给对方提供准确的信息,并且有利于通信内容的保密。与此相反,无线通信是经

有线通信  
无线通信

空间传播的,所以容易接受噪声和干扰,通信质量低,并且容易泄密。它的最大特点是能够在无法敷设通信电缆的飞机、船舶等移动体之间实现移动通信或卫星通信。

● 模拟通信与数字通信

电信系统中,信息是被转换成电信号传送的。如图 8.2 所示,这种电信号按其形态可分为模拟信号和数字信号。

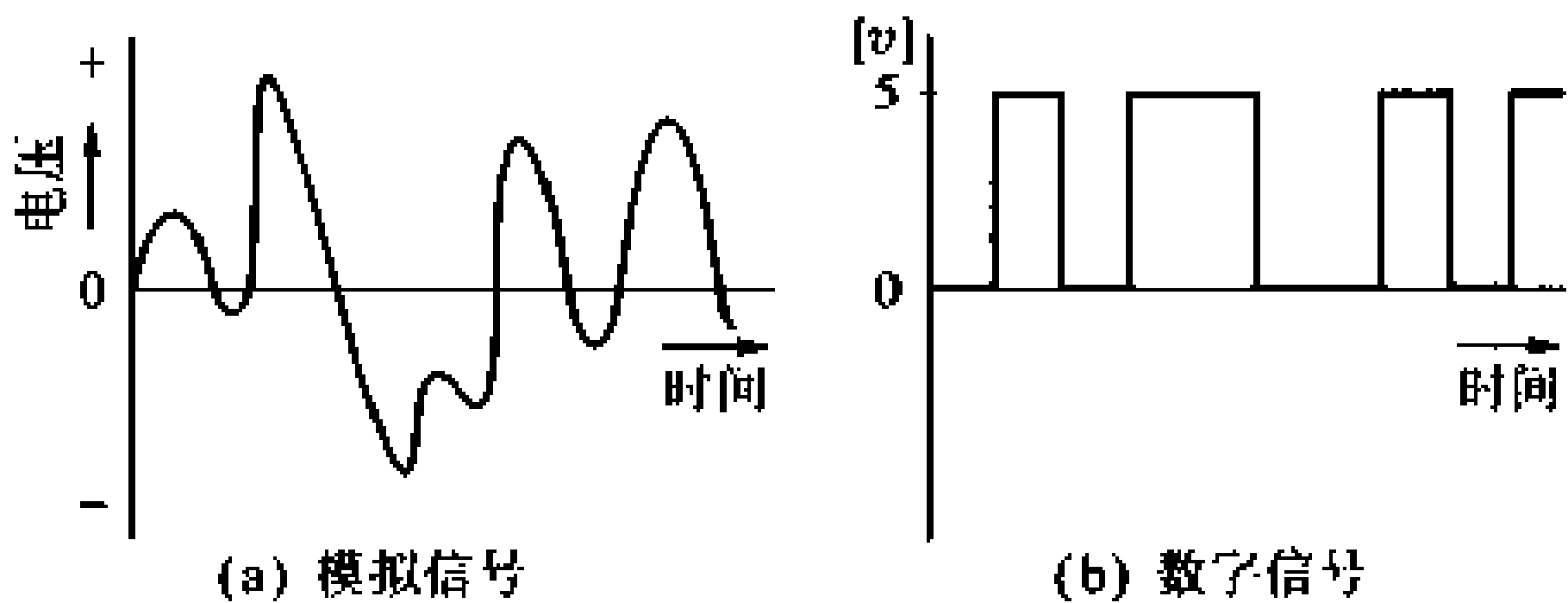


图 8.2 模拟信号与数字信号

模拟信号是电流(或电压)的大小随时间连续变化的信号,声音及电视图像信号就是模拟信号;数字信号是其信号值只有两个状态(例如电压值只取 0V 或 5V)的信号,计算机的数据信号是数字信号,模拟信号经 A/D 变换后也是数字信号。

模拟通信如图 8.3(a)所示,它是直接用模拟信号传送和交换信息的通信方式;数字通信如图 8.3(b)所示,它是直接用数字信号传送和交换信息的通信方式。

模拟通信  
数字通信

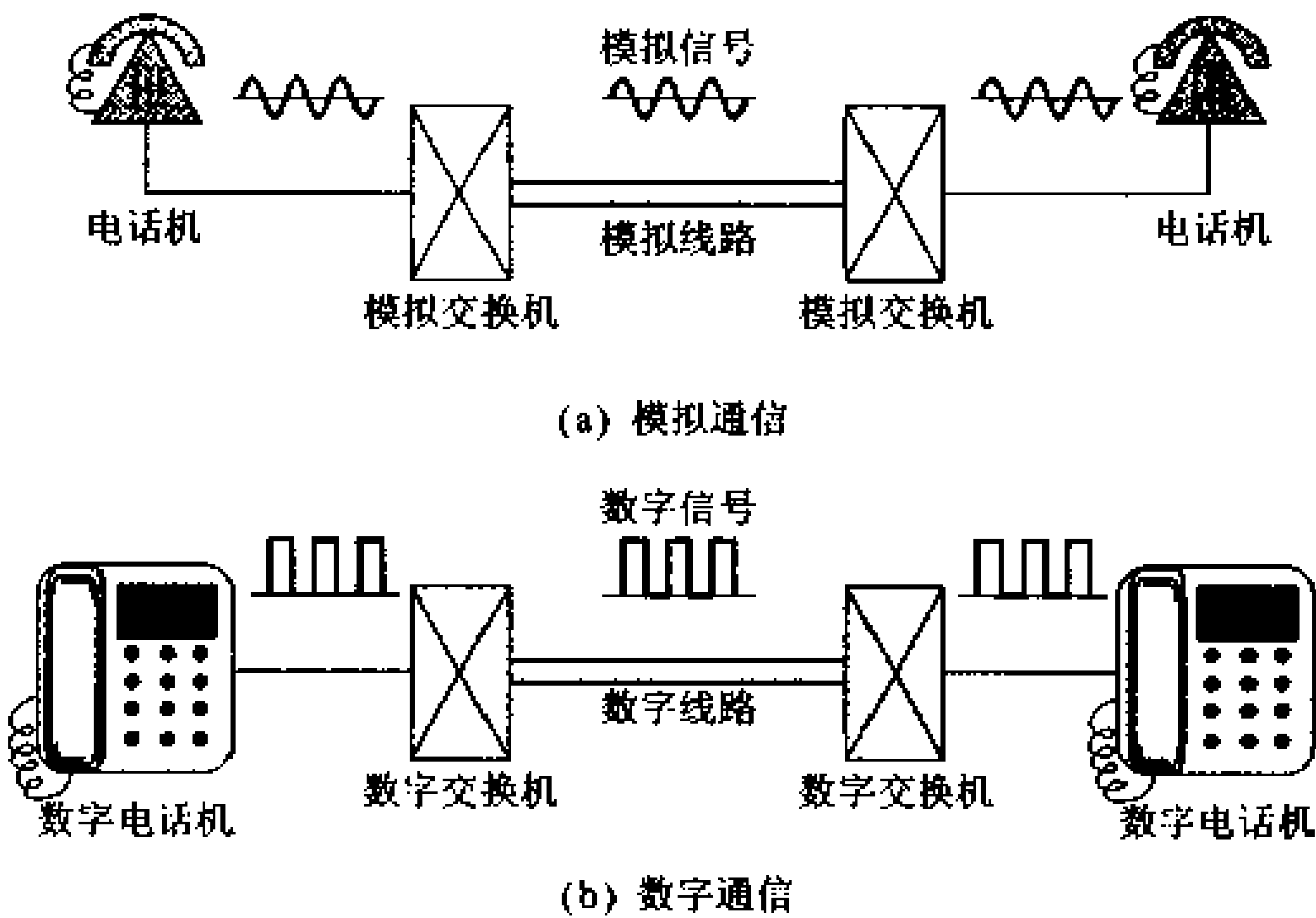


图 8.3 模拟通信与数字通信



## ● 通信的数字化

由于计算机技术的迅速发展和高速大容量通信的需要,通信网正在向数字化方向发展。

用模拟电话网进行数据通信并不是个好办法,因而便有了以数字通信为目的的高速数字线路和分组交换网。进而,能够对电话、传真、图像、数据传输等进行数字化综合处理的 ISDN (Integrated services digital network; 综合业务数字网)也已实用化。今后,将向着速度更高、容量更大的宽带 ISDN 发展。

ISDN

## □ 相关知识 ● 数据通信

在计算机技术发展过程中,最初,计算机多是单机使用,当要与外地进行数据等信息交换时,得由人把磁带或纸带送到邮局去邮寄。后来,由于计算机技术和通信技术的进步,计算机与计算机之间或计算机与数据终端之间的数据交换发展成用通信线路来进行,这就是数据通信。如图 8.4 示,数据通信按传输信号的形态又有采用调制解调器的模拟数据传输方式和采用 DSU 的数字数据传输方式。

数据通信

联机系统

预售票系统

银行的联机系统、火车票和飞机票的预售票系统等都是数据通信的实际例子。

## ● 通信系统实例

图 8.5 是以电话为例的电信系统。该系统是以家庭、商店、办

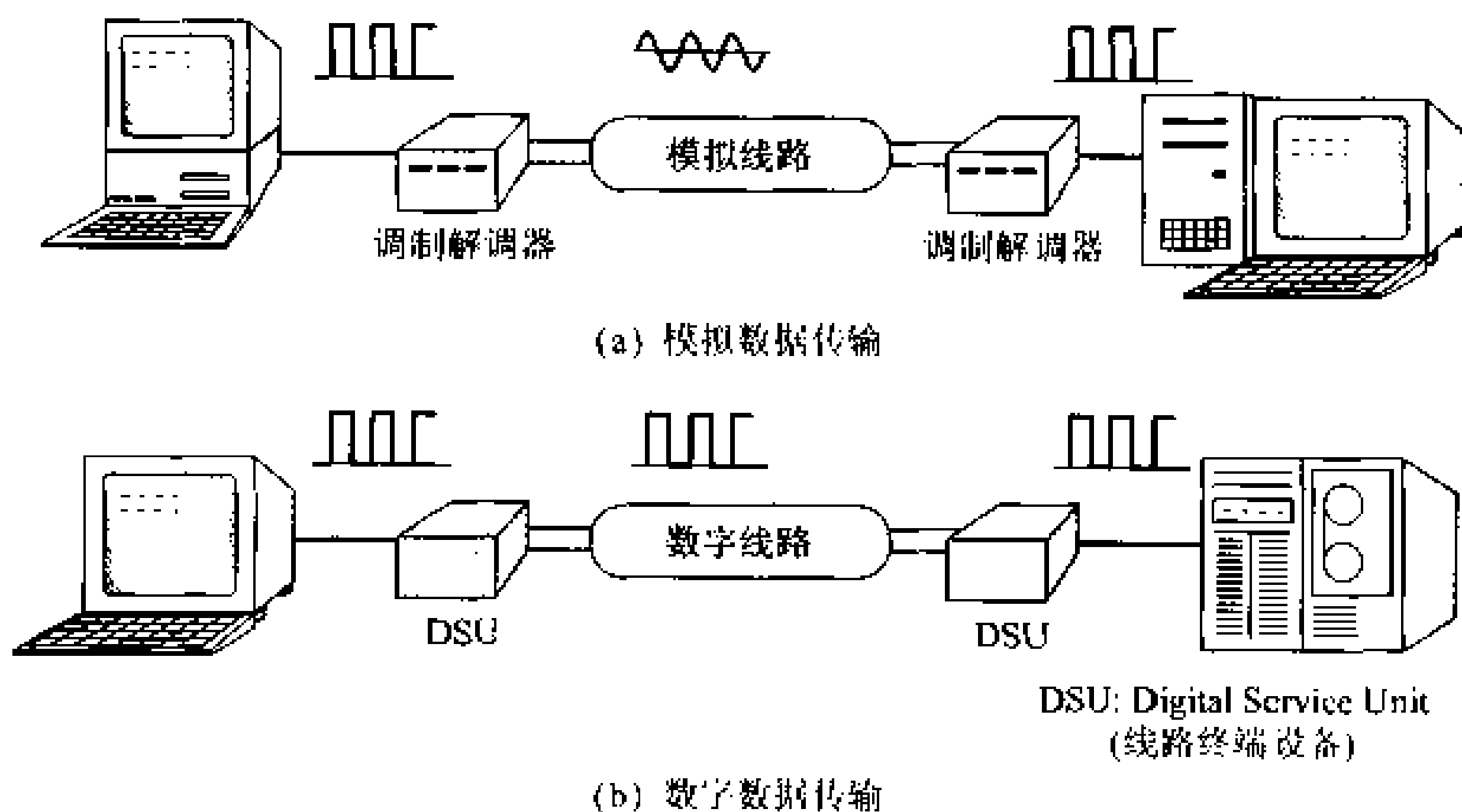


图 8.4 数据通信

公室电话为主并联接着汽车电话、便携电话 PHS (personal handy phone system; 简易型携带电话) 和数据终端的系统。

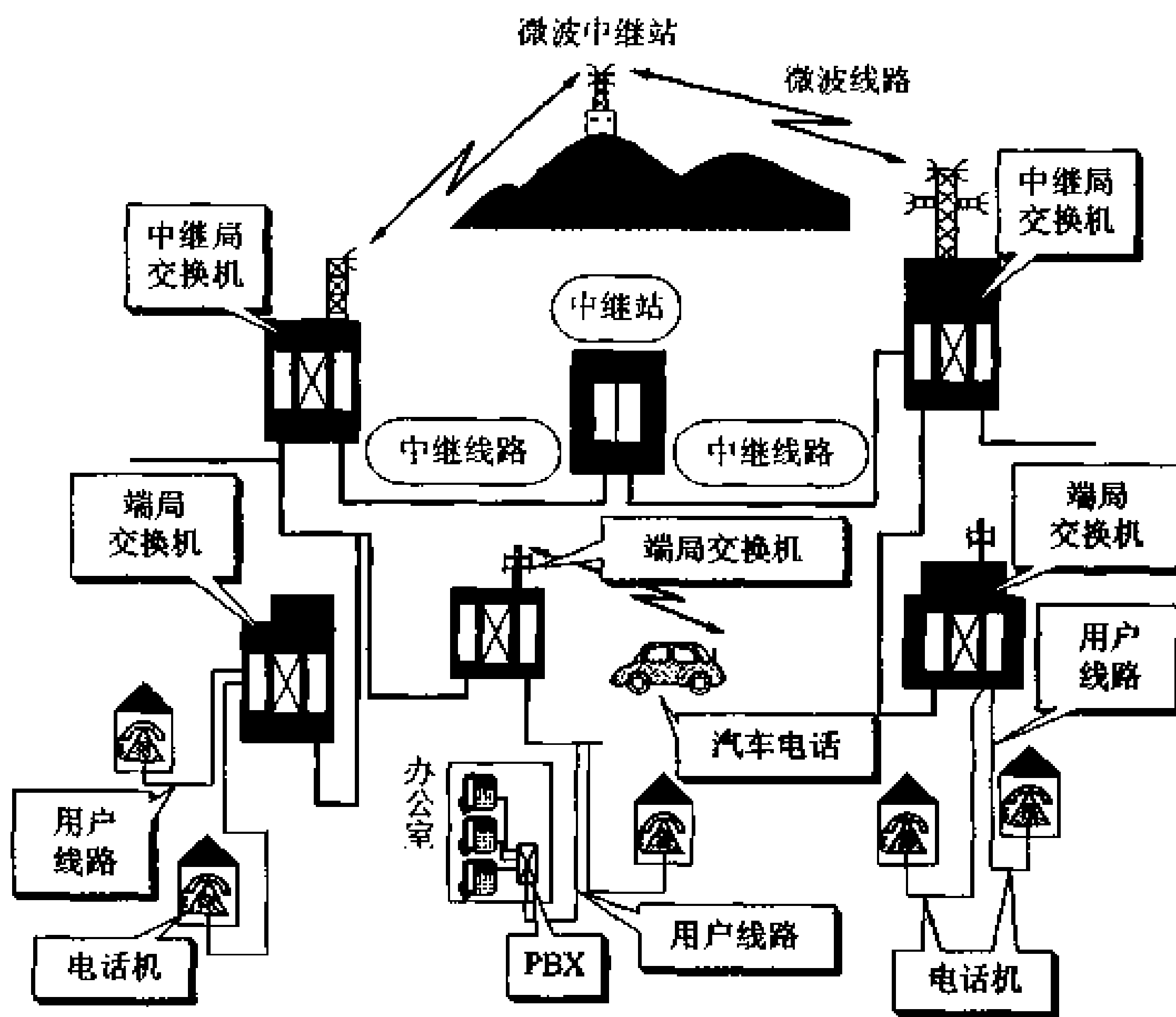


图 8.5 通信系统实例(电话)

## 2 电话的构成和电话机

### □ 要点

电话是一种通信装置,它将发话端的声音信号(声压)转换成电信号,通过传输线路送达接收端,在接收端再将电信号转换成声音信号。

### □ 解释

#### ● 电话的原理

电话的原理如图 8.6 所示。当声音(声压)作用于送话器的振动膜时,振动膜随之振动,加在炭粒上的压力随之变化,炭粒的接触电阻也随之变化,从而引起流过受话器线圈的电流(称为通话电流)发生变化。与之相反,由于电磁力的作用,通话电流使受话器的振动膜产生振动,受话器便重现出送话端的声音。

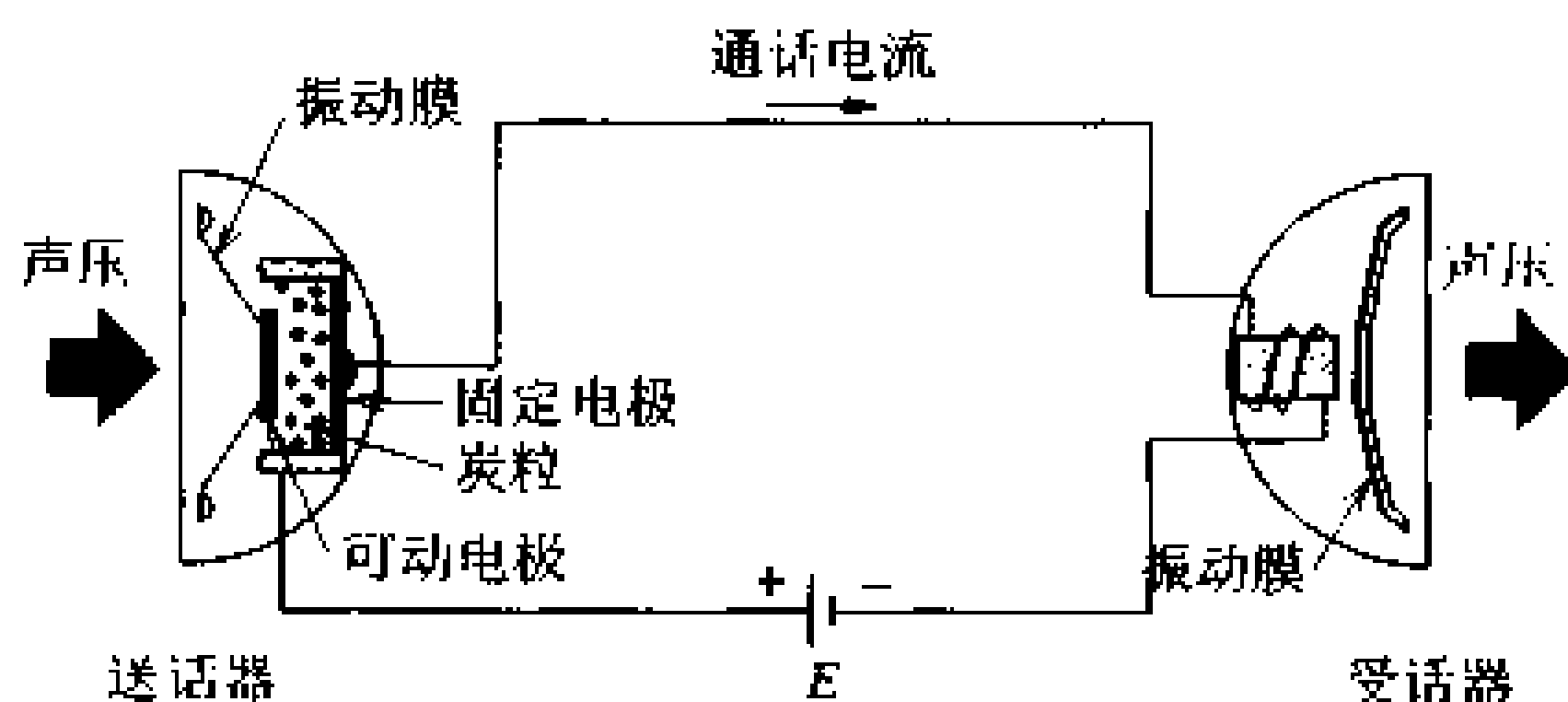


图 8.6 电话的原理

#### ● 电话机的基本组成

电话机由拨号机构、振铃机构和通话机构组成。拨号机构向交换机发出呼叫某个特定用户的拨号信号;振铃机构以铃声或音频(电子声)显示对方是否接通;通话机构的作用是把发话者的声音变成电信号和把来自对方的电信号变成声音,以及调整音量大小使对话更加舒适。

#### ● 送话器与受话器

送话器是把声音转换成电信号的装置,其变换方法有碳晶式、电磁式、电容式等。碳晶式送话器的转换效率高,具有不需要放大器的特点,但最近用得更多的则是具有小型轻量特点的电容式送话器。图 8.7 是电容式送话器的原理。

振动膜和固定电极构成一个平板电容器。当声压作用于振动膜时,振动膜的振动使电极之间的距离发生变化,从而引起电容量

拨号机构  
振铃机构  
通话机构

电容式送话器

驻极体式

变化,于是电阻  $R$  上就有电流流过。这一电流在电阻  $R$  上产生随着声压变化的电压,并经耦合电容  $C$  输出。实用中广泛采用的是驻极体式送话器,它是由拾音器和 FET 组合而成的,其中的拾音器振动膜材料采用了永久带电的驻极体电介质。

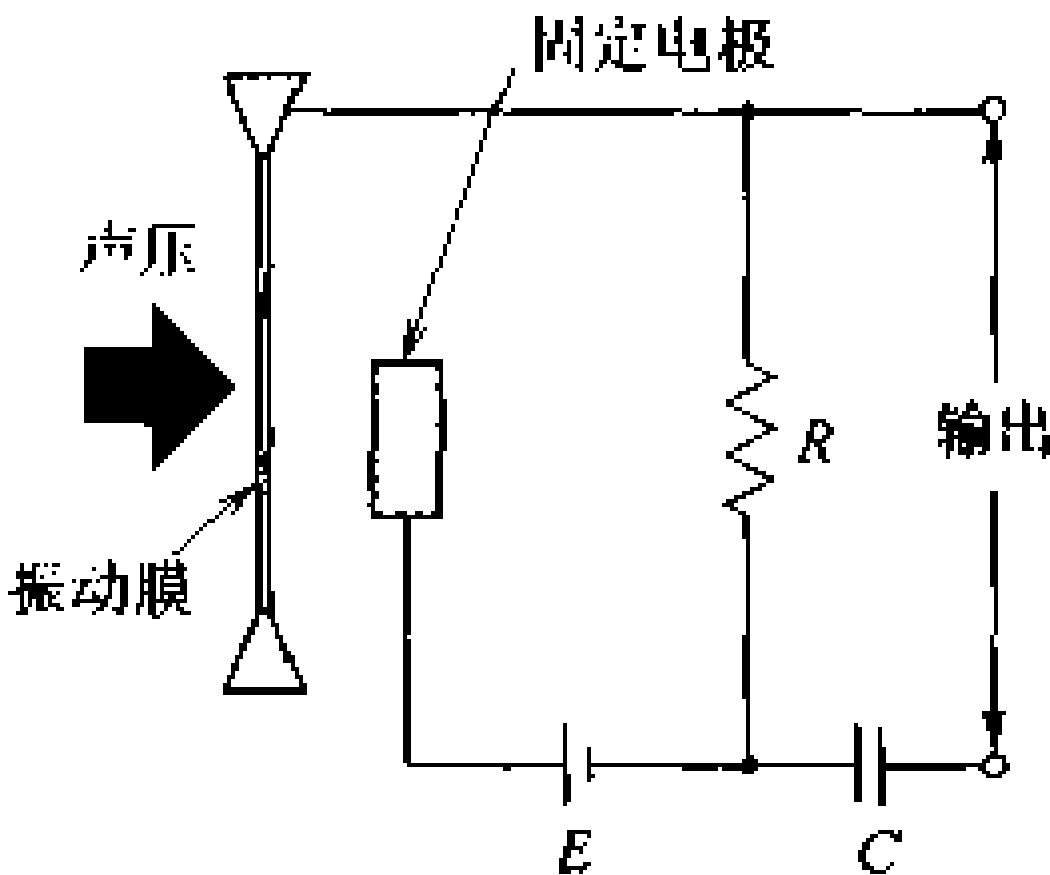


图 8.7 电容式送话器的原理

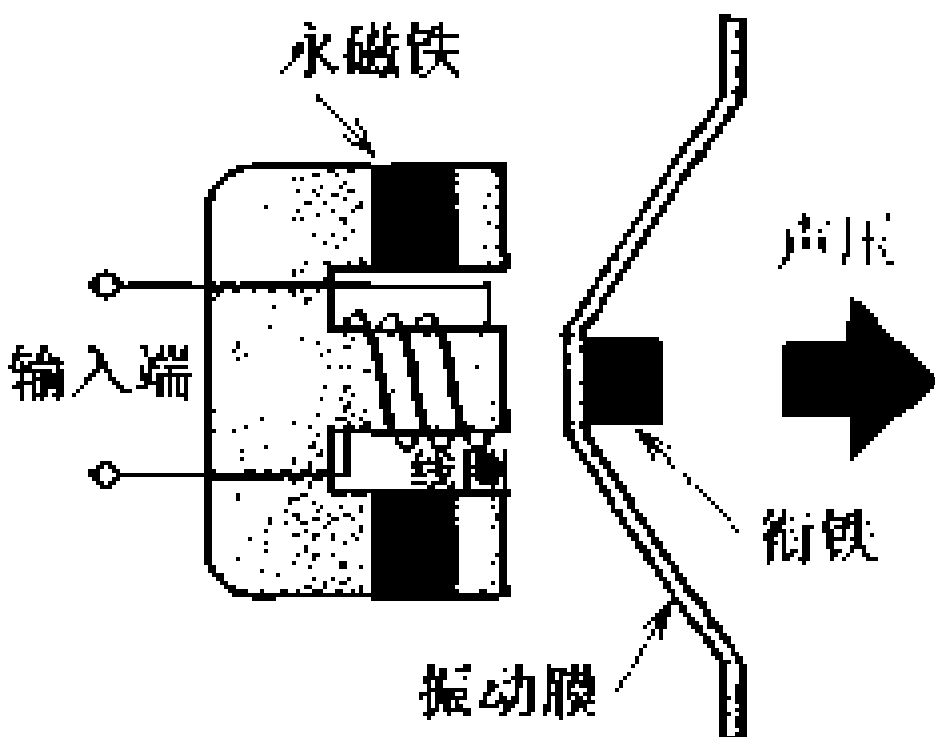


图 8.8 受话器(电磁式)的原理

电磁式

受话器是把电话线送来的电信号变换成空气振动(即声音)的装置。按其结构,受话器有电磁式、电动式、压电式等。图 8.8 是电磁式受话器。

压电式

振动膜上安装着一个衔铁(铁片),衔铁所受引力的大小决定于永磁铁的磁场和声音电流流过线圈时所产生的电磁力,这个电磁力使振动膜产生振动。这种电磁式受话器的灵敏度较高、机械强度高。最近,压电式受话器也被广泛采用,它是利用压电元件(陶瓷)的应变力使振动膜产生振动,具有结构简单、音质良好的特点。

● 拨号式电话机的原理

图 8.9 是拨号式电话机的电路结构图。拿起话筒时,叉簧开关  $HS_1$  和  $HS_2$  随即闭合,受话器中听到交换机发来的应答声。拨动对方电话号码时,拨号脉冲接点  $D_1$  产生断续动作,发出图 8.10 所示的拨号脉冲信号。在拨号脉冲送出的时间里,接点  $D_2$  把通话电路短路,保证脉冲确实发给交换机。并联在  $D_2$  上的  $R_1$  和  $C_1$  是用来防止接点  $D_2$  通断过程中产生火花放电的。振铃信号采用 75V 16Hz 的交流信号,从  $L_1$  经  $C_1$  驱动电铃。

送话电平调节电路和受话电平调节电路利用“非线性电阻上的电压超过某值时其电阻值急剧减小”的特性,使送、受话电平限制在必要音量所要求的电平值以内。话音冲击抑制电路也利用了非线性电阻,当话音信号突然超过规定电压时,并联在受话器上的非线性电阻将从受话器中分走一部分电流,从而起到抑制流过受

话器的电流的作用。

### 消侧音电路

消侧音电路是防止通话过程中从听筒听到自己声音(称为侧音)的电路,它是利用流过线圈  $L$  的感应电流的作用来实现的。

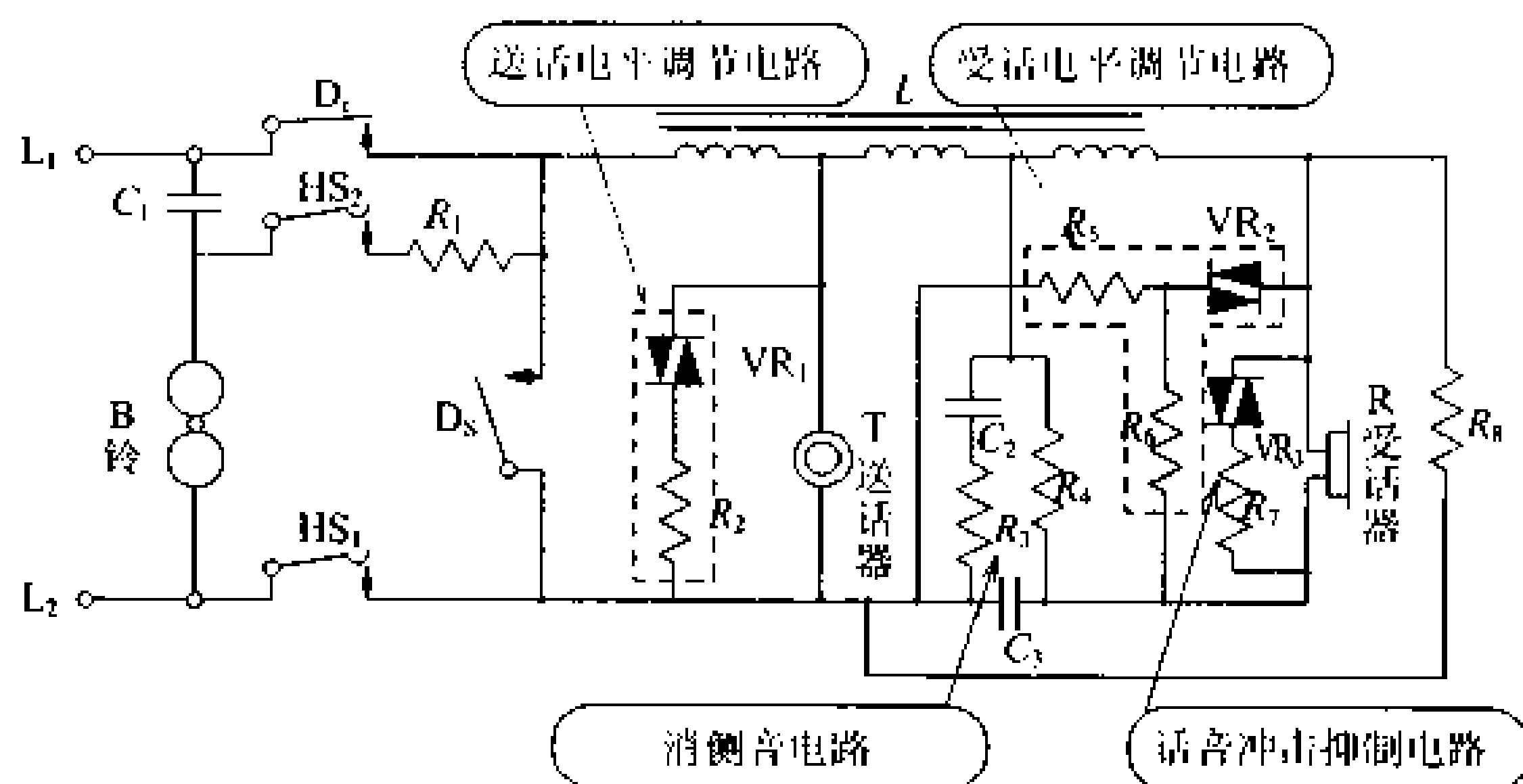


图 8.9 拨号式电话机的电路构成

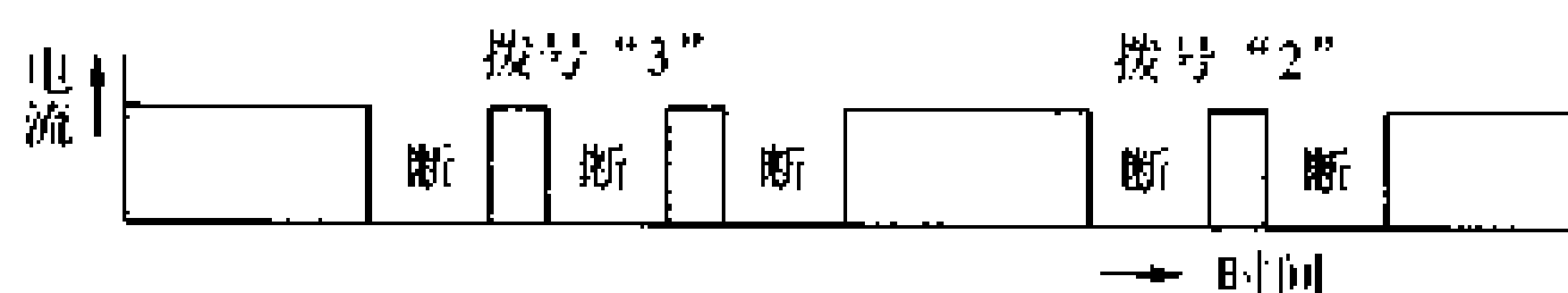


图 8.10 拨号脉冲信号

### ● 按键式电话机的原理

#### 拨号信号(PB 信号)

图 8.11 是按键式电话机的电路构成。拿起话筒时,叉簧开关  $HS_1$  和  $HS_2$  随即动作,电话局方面由交换机送出应答信号。这时若按下对方电话号码的按键,按键拨号信号发生器便发出拨号信号(PB 信号)。二极管  $D_2 \sim D_5$  所组成的电路是一个直流电压极性转换电路,它的作用是不管来自交换机的直流电压极性如何,都能保证加在信号发生电路  $LS1$  上的电压为同一极性。手动/自动开关是用来调节 PB 信号电平的。

PB 信号是通过按动号码键送给交换机的一个组合信号,该信号由图 8.12 所示的高音频群和低音频群组合而成。例如,当按“5”时,具有 770Hz 和 1336Hz 两个频率的 PB 信号就被送往交换机。交换机通过滤波器来识别 PB 信号和判断所按的键号。

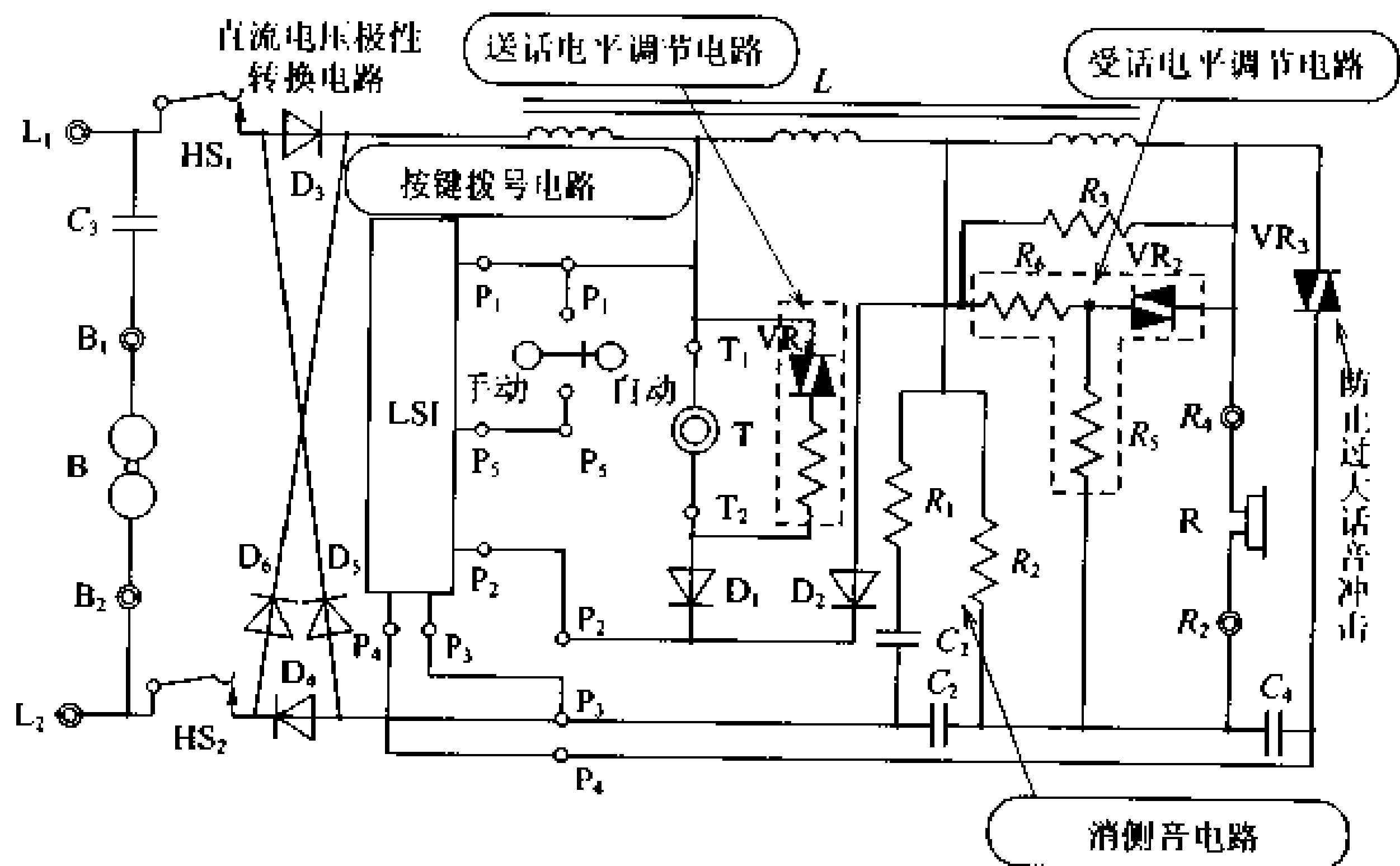


图 8.11 按键式电话机的电路结构

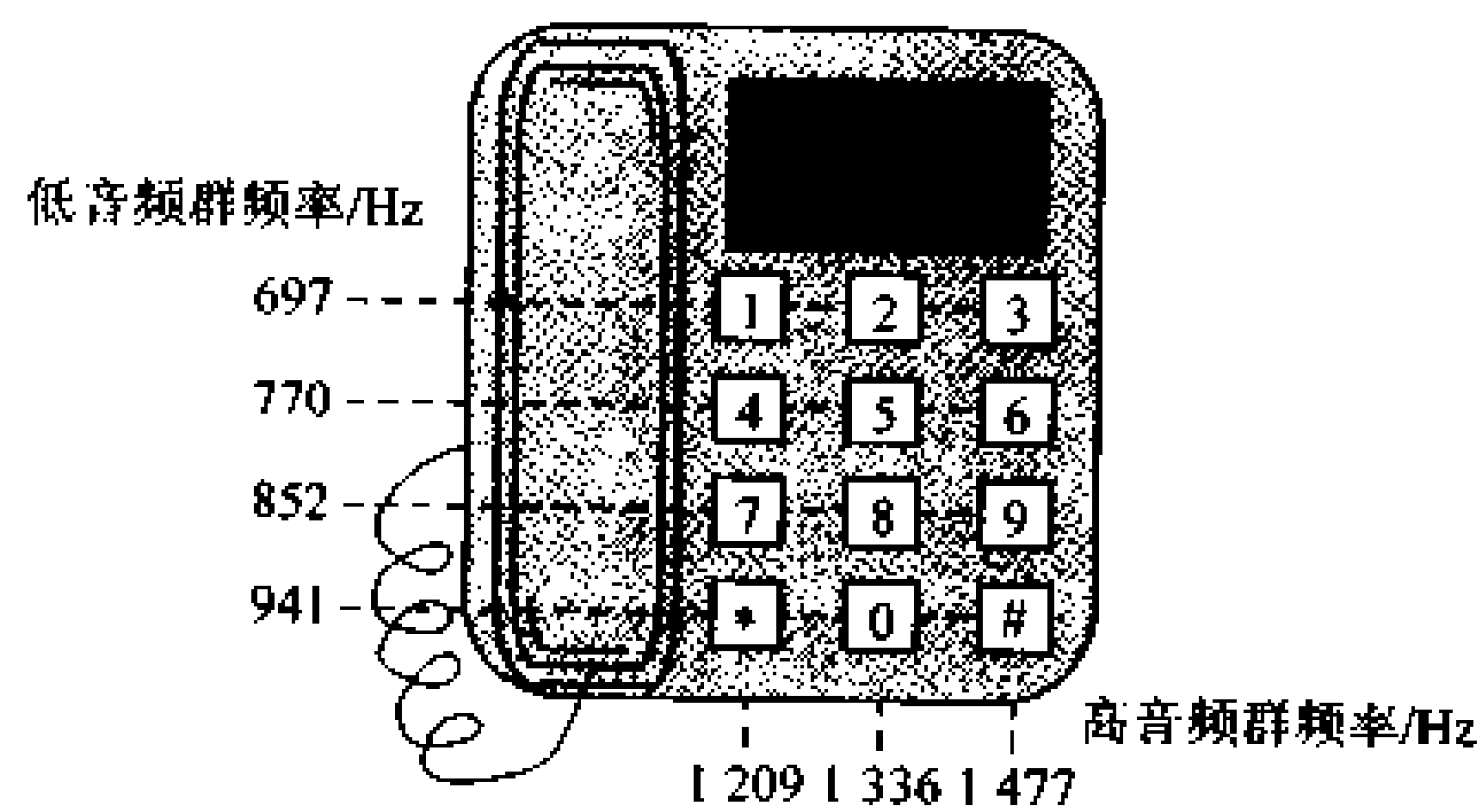


图 8.12 PB 信号的频率

### 3 电话交换机的原理

□ 要点

电话网中的交换机在提高端机间的接通率、增加通信系统功能和经济效益、以及信息化社会新电话业务的实现等方面起着重要的作用。随着计算机和数字技术的发展,数字交换机正在成为主流。

□ 解释

● 电话网与电话交换

若干个由电话机、用户线路、电话交换机、传输线路等构成的电话系统相互结合在一起所构成的网络,称之为电话网。

电话机是经由用户线路汇接在交换机上的,交换机按照用户的通话要求接通通话双方的传输线路的过程称之为电话交换。图 8.13 是一个电话网基本构成的例子。

总局

地区总局

分局

端局

从上到下依次为总局 (regional center; RC)、地区总局 (district center; DC)、分局 (toll center; TC)、端局 (end office; EO),用户电话与端局相联接。

#### ● 纵横式交换机

纵横式交换机由纵横接线器和集中控制装置构成。纵横接线器是交换机的话路转接装置,它的接点是机械式的,接点上连接着用户线或中继线。纵横接线器接点的接通与交换受集中控制装置的控制。

布线逻辑控制方式

这种方式也称为布线逻辑控制方式,其缺点是各种功能的互换性很差。图 8.14 示出纵横式交换机的构成。

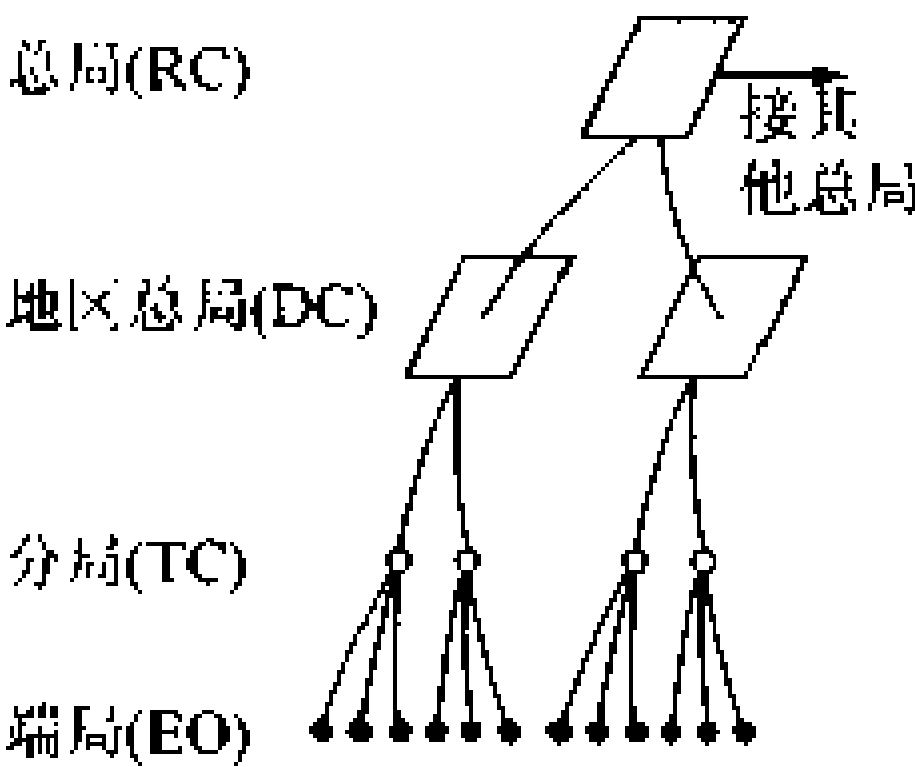


图 8.13 电话网的基本构成

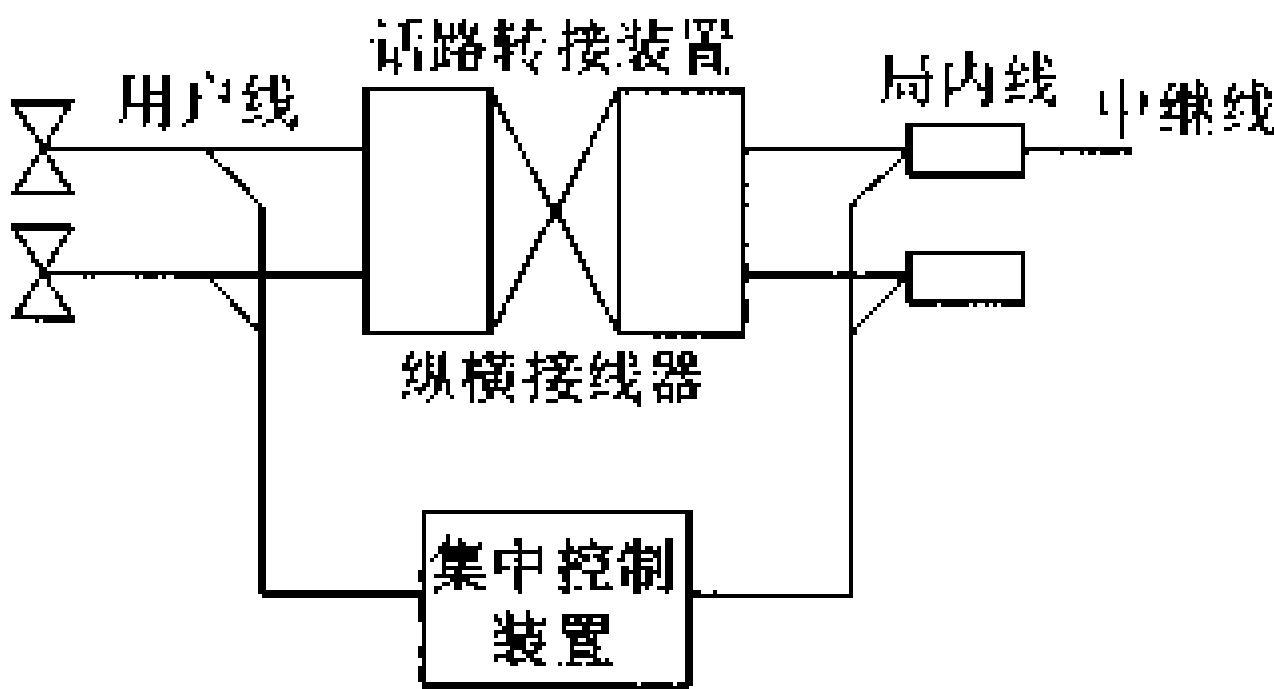


图 8.14 纵横式交换机的构成

#### ● 电子式交换机

电子式交换机采用了存储程序控制方式,交换机的动作由软件(程序)来控制。

图 8.15 示出电子式交换机的基本构成,它是由实现交换连接的话路转接装置(采用了半导体开关)和话路转接控制装置、对用户信号进行分时扫描的扫描装置、向中央控制装置输入输出数据的输入输出装置、以及控制上述各部分的中央控制装置构成的。

与纵横式相比,电子式交换机的特点是交换速度快、能方便地利用软件改变处理条件或增加功能等。

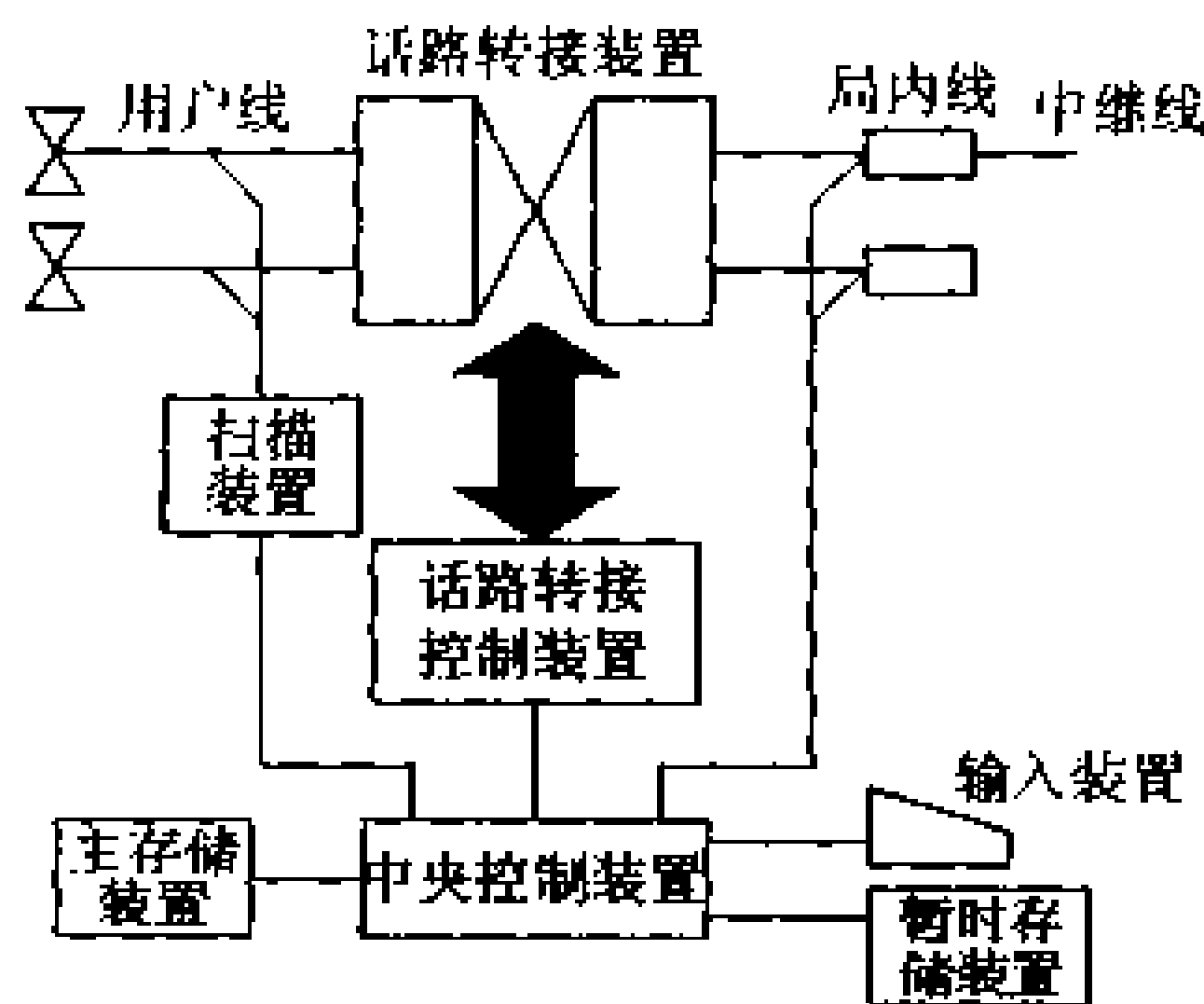


图 8.15 电子式交换机的基本构成

● 数字交换机

时分交换

进入数字交换机的话音信号是时分复用数字信号,交换机的话路转接装置是以时分交换方式进行的。所谓时分交换,就是通过更换时分复用数字信号的时间段配置来实现交换的方式,它由时间开关和空间开关构成。

图 8.16 示出数字交换机的原理。随着数字技术和软件技术的迅速进步,这种交换机已广泛应用于数字传输的通信当中。

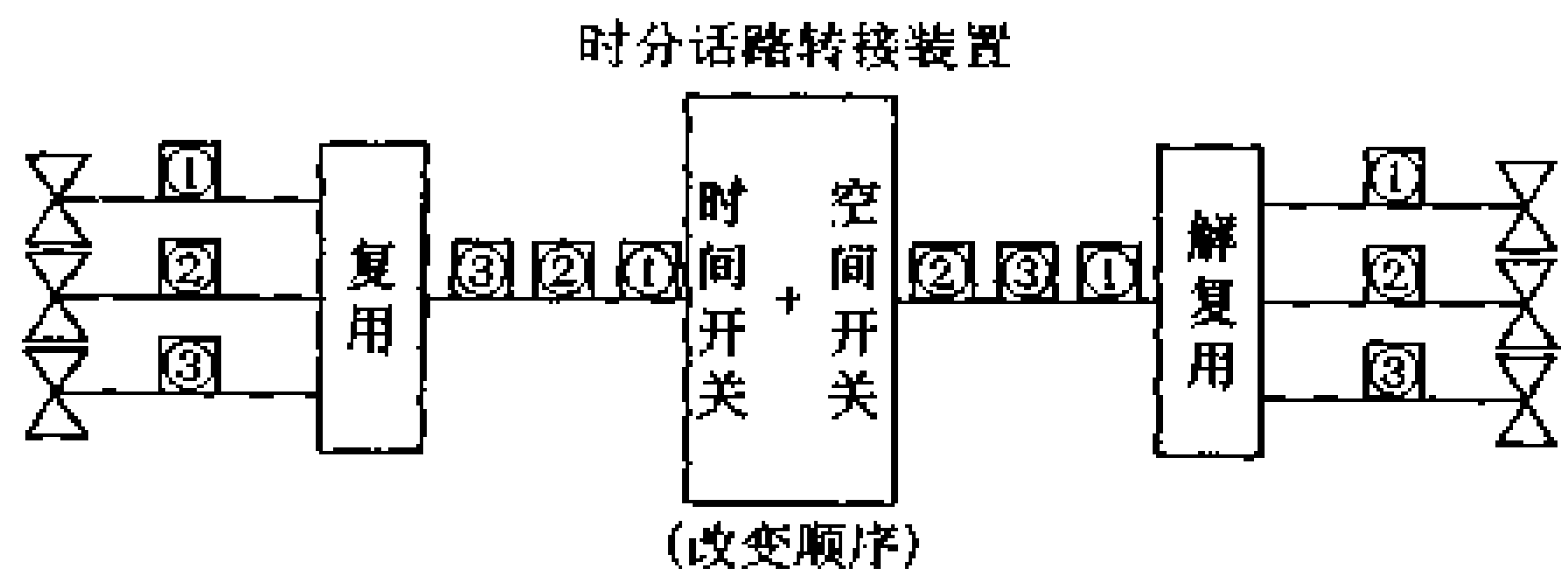


图 8.16 数字交换机的原理



## 4 通信线路的结构和种类

### □ 要点

通信线路的电气性质与通常视为“集中参数电路”的一般电路不同,它是一种“分布参数电路”。按照其使用目的,通信线路的材料常选用通信电缆和光缆。

### □ 解释

#### ● 传输线路

电信领域里,当连接发送端和接收端的传输路径距离大于所传信号的波长时,称之为传输线路。传输线路上的电压和电流的分布与一般电路中的状况是不同的。

当给图 8.17(a)所示的无限长平行线线路接上信号源时,线路上各点的电压和电流值并不相等。这种情况下,传输线路可以等效为图 8.17(b)所示的电路,即传输线路被看作是由均匀分布的串联电阻  $R$ 、串联电感  $L$ 、并联电容  $C$  和并联电导  $G$  所构成的电路,称之为分布参数电路。单位长度(1km)线路所相当的  $R$ 、 $L$ 、 $C$ 、 $G$  称之为线性参数。分布参数电路的阻抗(电压与电流之比) $Z_0$ 可用下式表示,称之为特征阻抗。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (8.1)$$

式中,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为信号源的频率。

分布参数电路

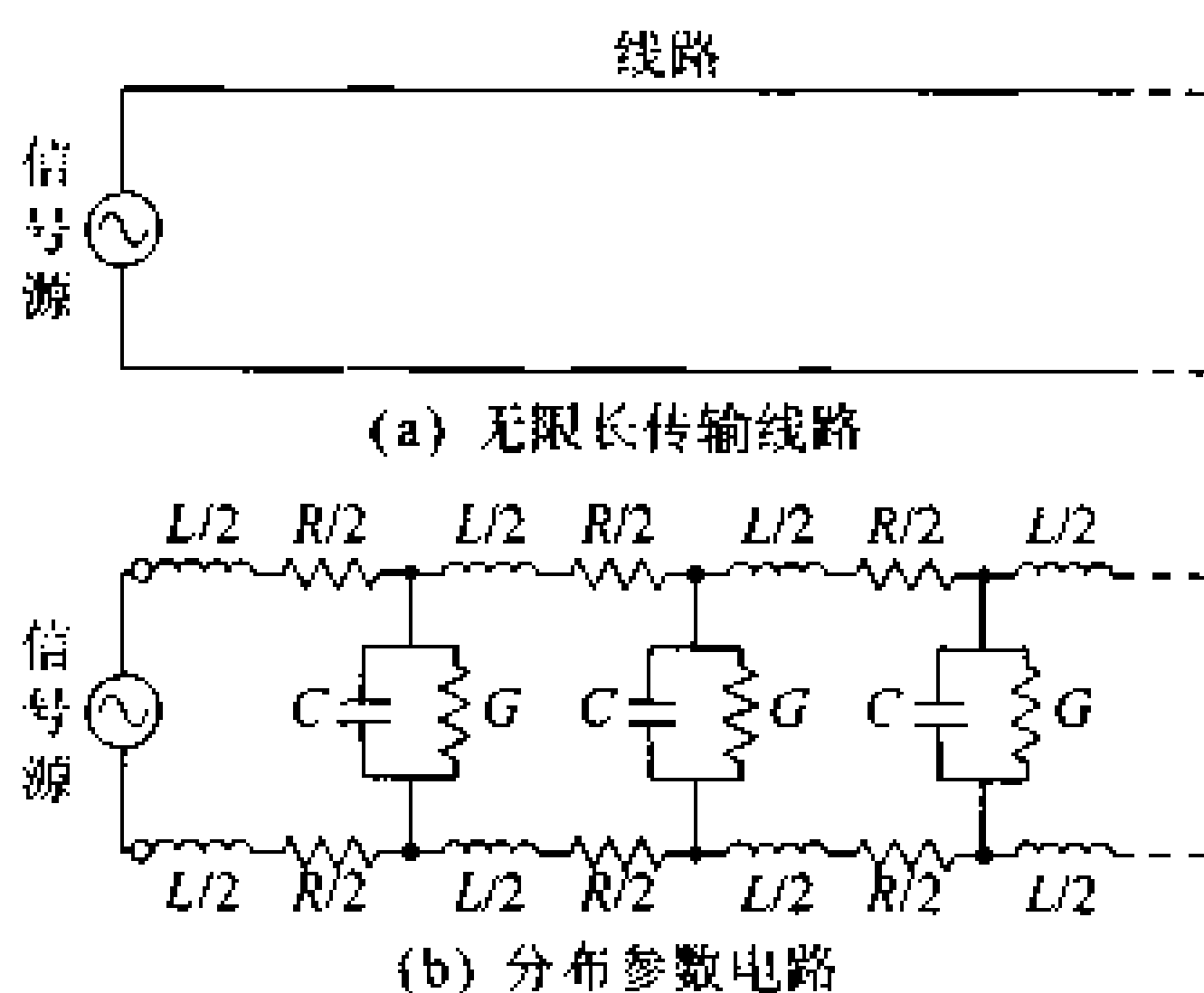


图 8.17 分布参数电路

#### ● 通信线路的种类

由于要在各种各样的环境下敷设,有线通信线路应有足够的

机械强度和稳定的传输特性,经济性要好,并且应便于维护。

作为传输介质,常采用以金属为导体的通信电缆或光纤电缆。通信电缆有对称电缆和同轴电缆两种,对称电缆又可分为二芯电缆和四芯电缆等。

对称电缆

对称电缆以  $\phi 0.3\text{mm}\sim 0.9\text{mm}$  的铜线作为芯线,外面用聚乙烯或纸加以绝缘,两根线呈绞合在一起的形状。

实际应用中,为了提高电缆的柔性(可弯曲的程度)和改善串话特性(防止其他传输线路中的信号窜进来),常把 4 根芯线归为一组或者再把它们一层一层地捆地起来使用。图 8.18 示出对称电缆的结构。

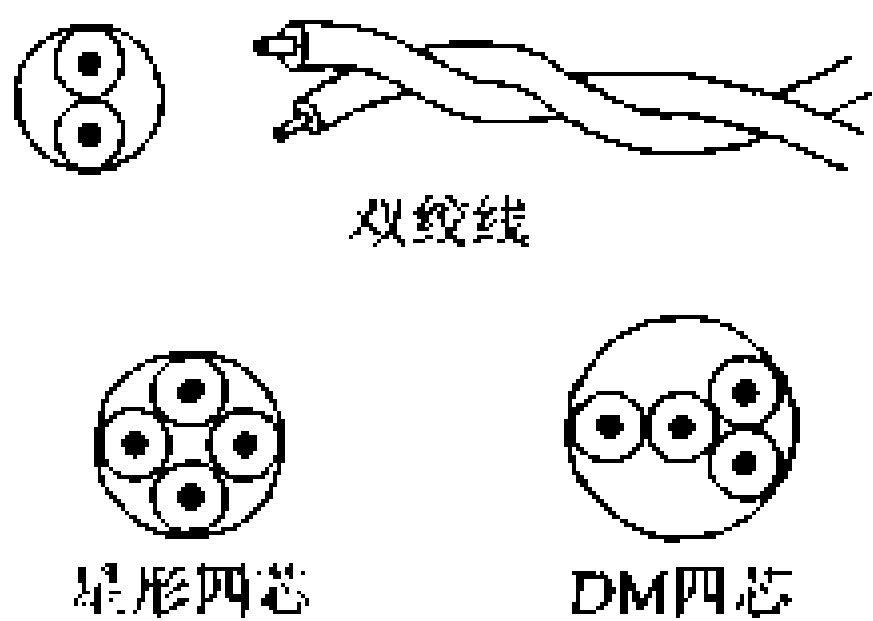


图 8.18 对称电缆

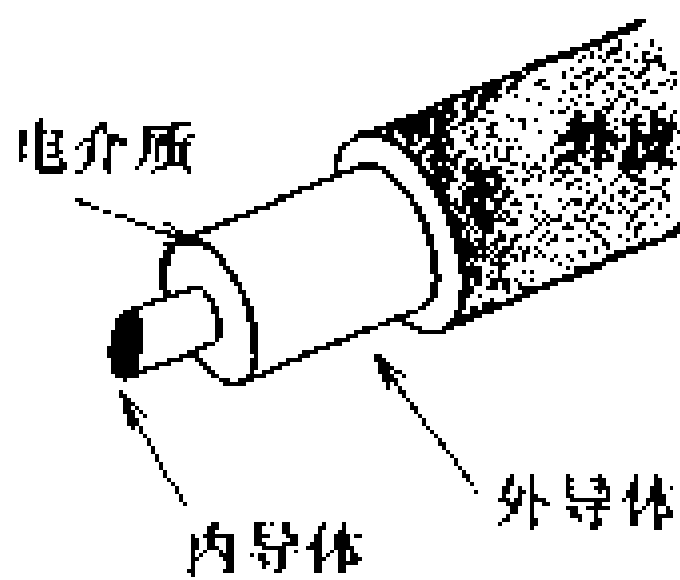


图 8.19 同轴电缆

同轴电缆

同轴电缆如图 8.19 所示,是由内导体和包在其同心圆上的外导体构成的。与对称电缆相比,同轴电缆防外部干扰和防高频串话特性好,传输损耗也比较小,可用于宽频带传输。

光缆

光缆如图 8.20 所示,它是由两种折射率不同的物质构成的,导光部分(芯线)只有人的头发丝那么细。构成光纤的材料有电介质石英( $\text{SiO}_2$ )、塑料(硅树脂、丙烯酸树脂)等。为了提高机械强度和传输特性的稳定性,实际的光缆做成图 8.21 所示的三层结构。与以往的铜线电缆相比,这种光缆的传输频带宽,具有能实现高速度高质量传输的特点(参看 8.6 节)。

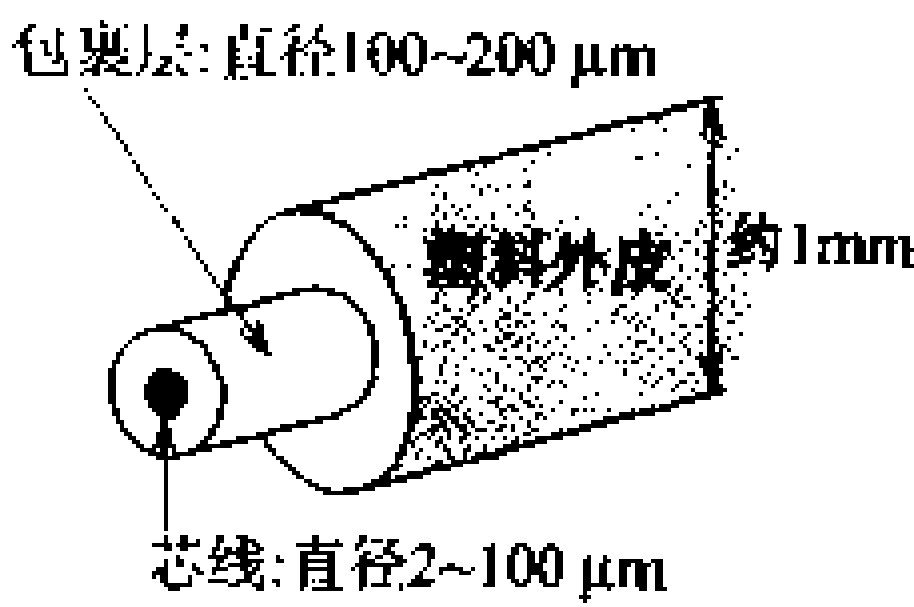


图 8.20 光纤的结构

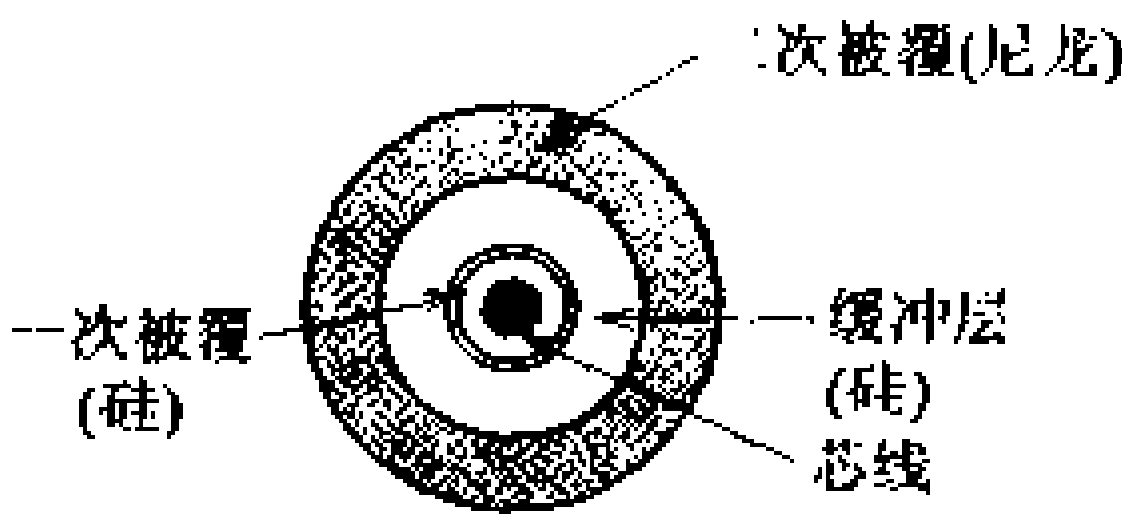


图 8.21 三层结构的单芯线

## 5 多路通信原理

### □ 要点

多路通信是指用一条传输线路同时传送多个信号,是一种高效利用传输线路的技术。多路复用的方法有频分复用(FDM)和时分复用(TDM)等。

### □ 解释 ● 频分多路复用与载波通信

这种方式用于模拟传输的多路复用。通过对多个信号各分配一个不同频率的载波把传输线路的频带按频率分割开来,而全部信号共同使用一条传输线路同时加以传送。

#### 频分多路复用

图 8.22 是频分多路复用原理的示意。发送端的输入信号 A、B、C 分别调制到载波  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  上,经滤波后作为复用信号送给传输线路。接收端进行与复用相反的处理,取出原来的信号。

多路复用的调制方式有幅度调制(AM)、频率调制(FM)、相位调制(PM)等。其滤波器要用到低通滤波器(LPF)和带通滤波器(BPF)。

#### 载波通信

由于这种频分复用方式是采用不同频率的载波来实现复用的,所以也称为载波通信。

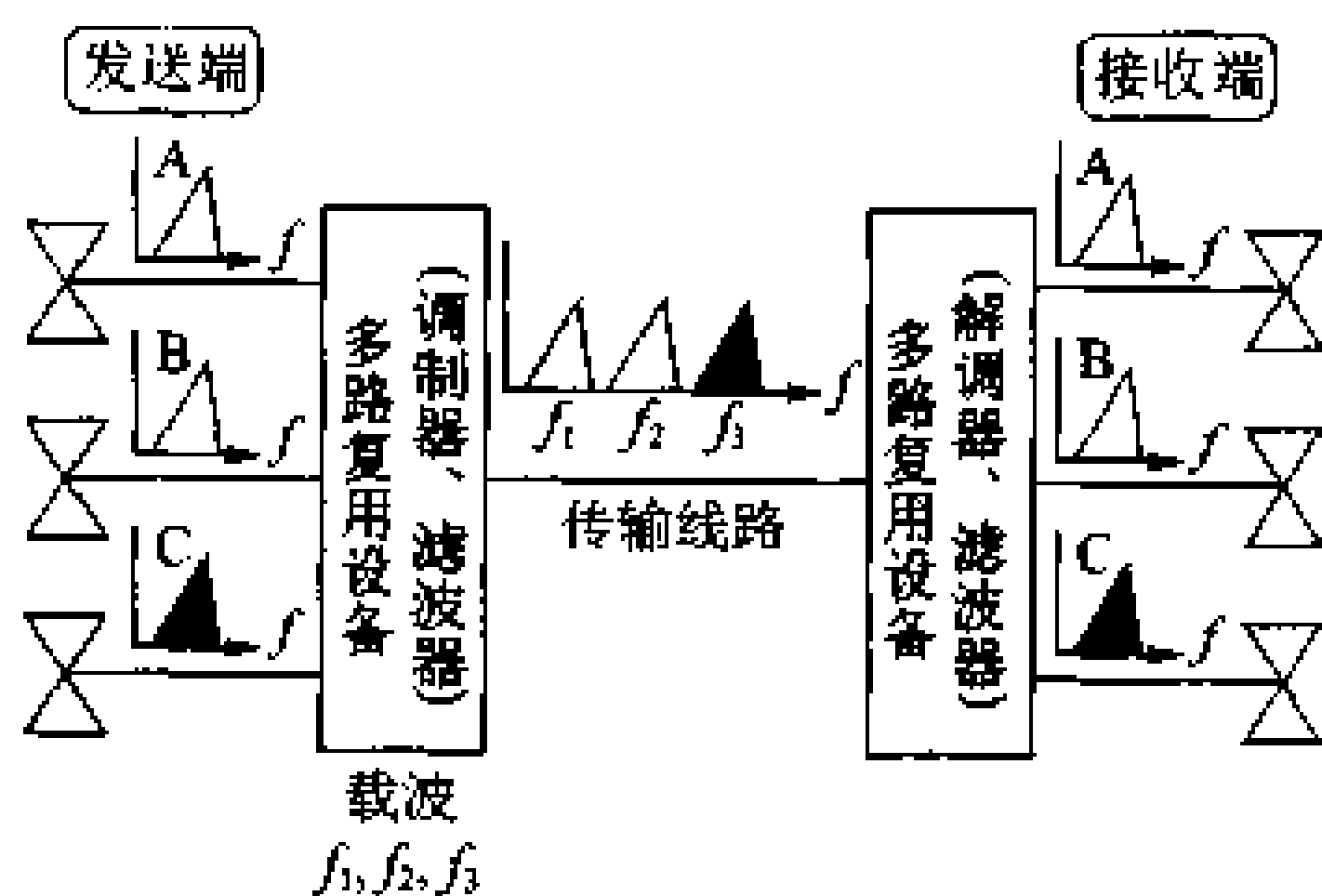


图 8.22 频分多路复用的原理

### ● 时分多路复用

这种方式用于数字传输的多路复用。发送端按一定的周期将多个信号轮流取出并按顺序送给传输线路,接收端按照相同的时序(同步)接收发送端发来的脉冲序列,并按原来的信号通道分开,从而恢复原信号。这种将一条传输线路按时间分割成多个通道来

时分多路复用

提高传输效率的方式称为时分多路复用方式。图 8.23 是时分多路复用原理的示意。当复用信号是声音信号之类的模拟信号时，要先把模拟信号用脉冲编码调制(PCM)变换成数码信号。

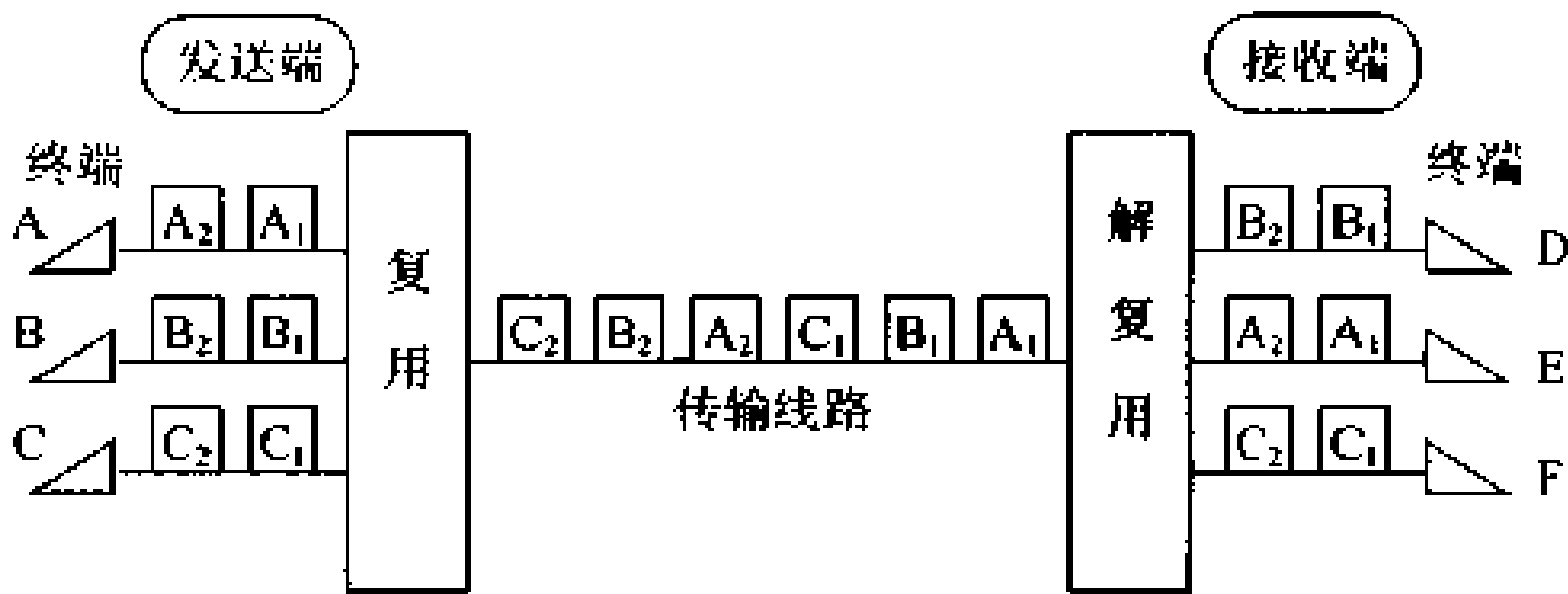


图 8.23 时分多路复用的原理

□ 相关知识 ● 同步与多路通信方式

时分多路复用通信中,当被复用的数字信号时钟频率不同时,其同步方法有旗脉冲同步方式和网同步方式。

旗脉冲同步方式

旗脉冲同步方式是在多个输入信号中间插入标志脉冲,把各输入之间的频率凑齐,并使之与网内时钟同步。

网同步方式

网同步方式大致可分为主从同步、独立同步和互同步。从经济性和稳定性方面考虑,一般多采用把从局同步在主局时钟上的主从同步方式。

● 脉冲编码调制

脉冲编码调制 (PCM: pulse code modulation) 就是把声音等模拟信号的幅度大小按一定的周期进行抽样,并将抽样值变换成数码脉冲。

PCM 按以下的顺序进行。

采样

采样:按一定的周期对原信号波形进行测量,即采集信号值的样本。采样频率必须是原信号最高频率的 2 倍以上。

量化

量化:将样本脉冲的幅度采用进位或舍尾的办法变成量化间隔的整量值。

编码

编码:将量化后的值变换成 2 进制码,每个码位上都只对应着脉冲的有无。

## 6 光通信原理

### □ 要点

光通信是把电信号转换成光强度来进行传送的通信方式,是由于光纤、半导体激光器、发光二极管等技术的开发成功而得以实现的通信技术。

### □ 解释 ● 光通信的原理

光通信的原理可以用图 8.24 来示意。发送端的电信号由发光元件变换成光信号(E/O 变换)后沿着光纤传播,接收端由受光元件再把这种光信号变换回电信号(O/E 变换)。发光元件有发光二极管(LED)和激光二极管(LD),受光元件有雪崩光电二极管(APD)、PIN 光电二极管等。

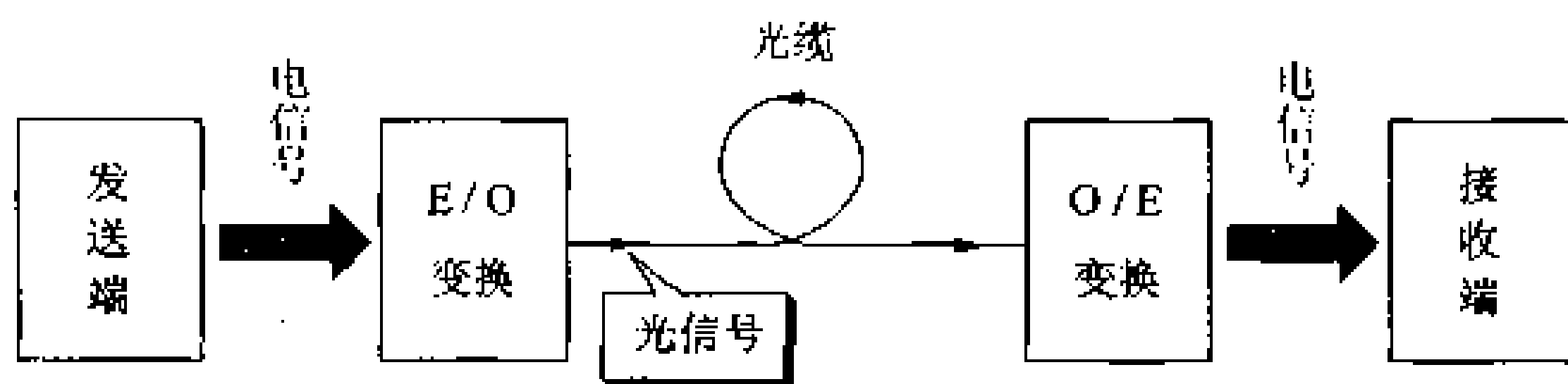


图 8.24 光通信的原理

### ● 激光振荡

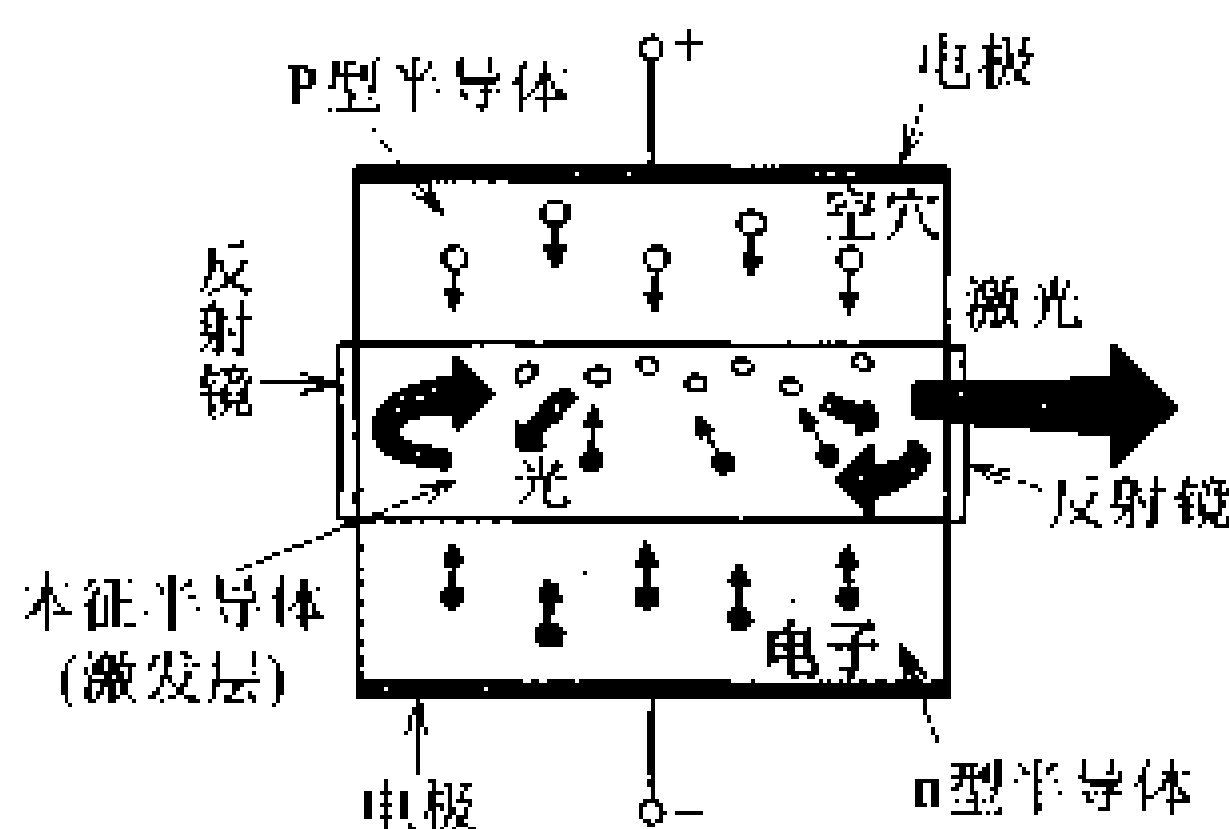


图 8.25 激光振荡的原理

图 8.25 是激光振荡的原理图。激光二极管的结构与 PN 结二极管相同,当加上如图所示的电信号时,由于载流子复合而发光(复合时自然发光),该光进而因受激发射而被放大成为更强的光,这些被放大的光经反射镜多次反射,光强度越

来越大,最终形成强振荡的激光。这样产生的光是单波长的,聚焦性好,光输出强度大,适用于长距离的高速大容量数字传输系统。

此外,这种激光不仅能用于通信系统,各种工件的精密测量、

切割及钻孔等机械加工、利用激光反射进行测量、激光刀在医疗上的应用等许多方面也都已进入实用化阶段。

● 光 纤

芯线  
被覆层

如图 8. 26(a)所示,光纤的中心是折射率大的芯线,芯线周围是折射率小的同心圆状被覆层。

如图 8. 26(b)所示,当光以大于临界角的方向入射到芯线上时,就在芯线与被覆层的界面上不断地产生全反射,从而以密闭状态在芯线内部向前传播。

单模    多模

按照光的传播方式,光纤有单模和多模两种,多模光纤又可分为阶梯折射率型和缓变折射率型。

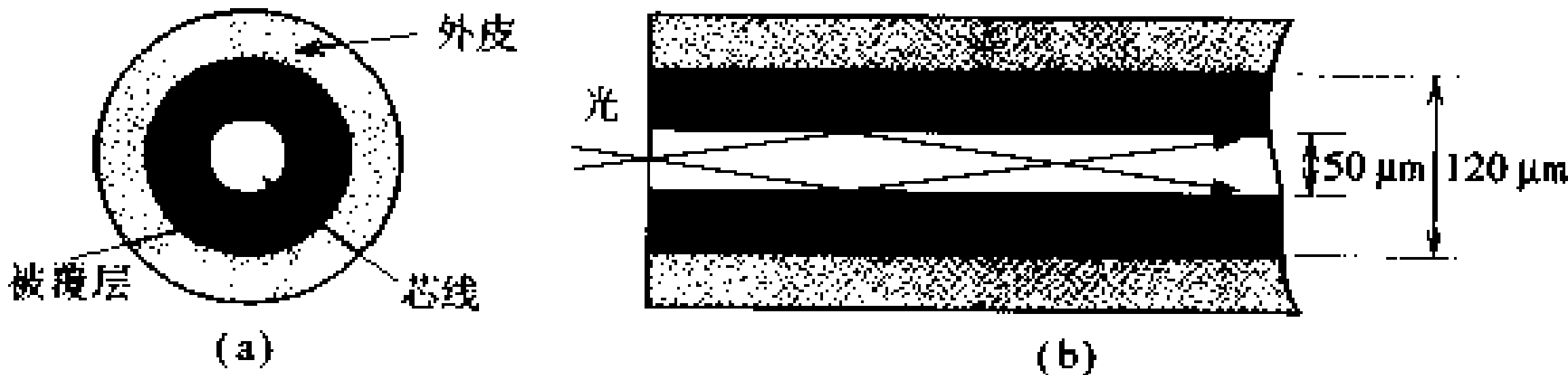


图 8. 26 光纤的结构

● 光缆的特点

- ① 传输损耗小,适合于长距离传送;
- ② 频带宽,传送容量大;
- ③ 是电的绝缘体,不受电磁感应影响;
- ④ 光信号被密封在光纤中,无串话;
- ⑤ 重量轻,柔性好。

## 7 电波的性质及传播方式

### □ 要 点

方向和大小随时间作周期变化的电学量称为交流电,其变化的一次重复称为一个周期,每秒的周期数称为频率,频率的单位用Hz表示。频率在 $3 \times 10^6$  MHz以下的交流电主要表现为电磁波,也称为电波。电波以与光速( $3 \times 10^8$  m/s)相同的速度在空间传播,传播速度除以频率就是电波一个周期传播的距离,称为波长,用字母 $\lambda$ 表示。如图8.27所示,电波以其电场与磁场相互正交的形式向前传播,波长越短,传播越具有直线性,越接近光的性质。长波段的电波以地面波形式传播,短波段的电波主要以地面波和电离层反射波传播,频率在超短波段以上的电波以直接波和地面反射波形式传播。

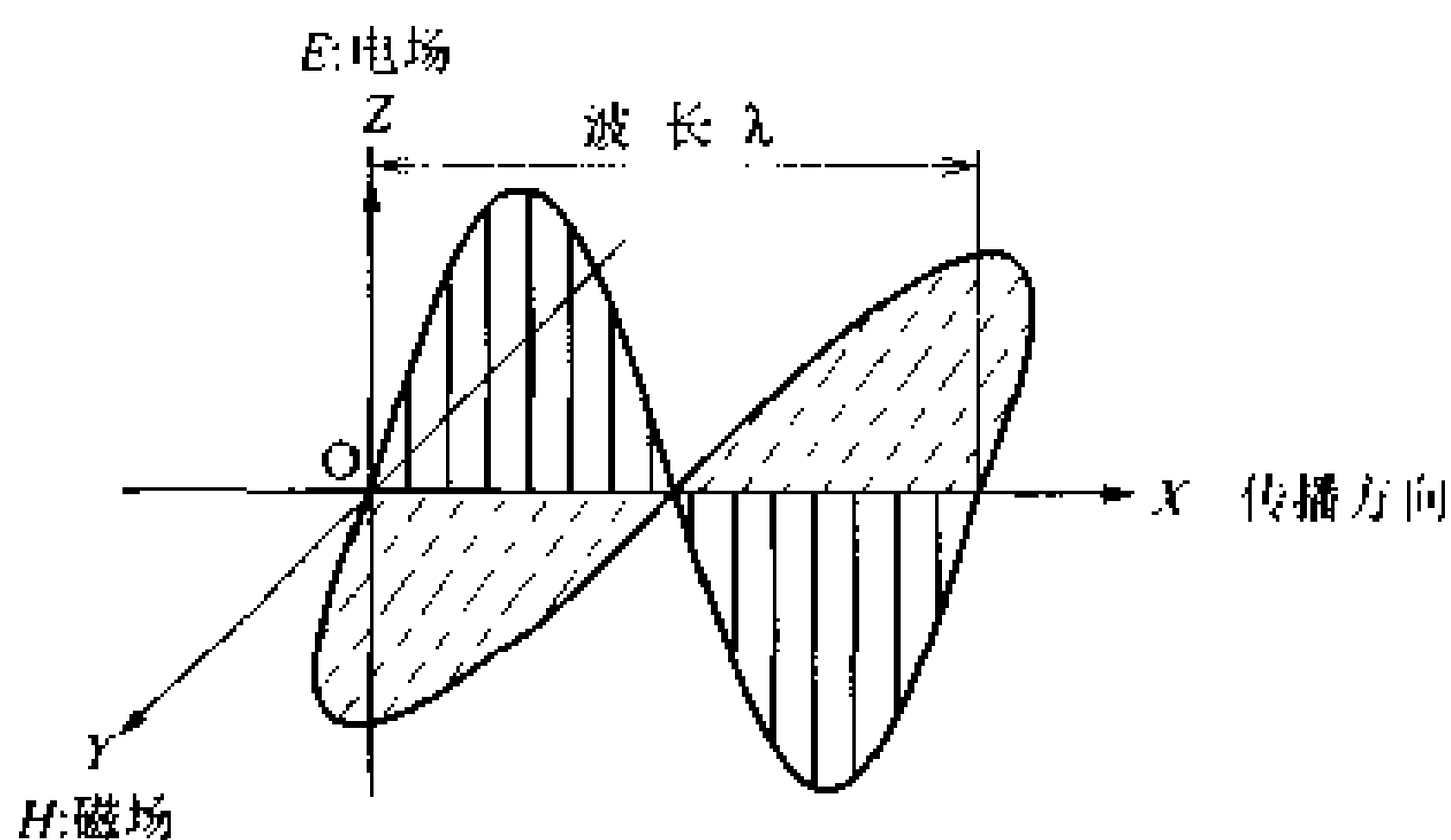


图 8.27 电波的磁场与电场

### □ 解 释 ● 电波的分类

电波都对应着一定的波长或频率,一定频率范围内的电波具有相似的性质。表8.1为按波长或频率进行的分类。

表 8.1 电波的分类

频带划分及符号	频 率 范 围
长波(LF)	30~300kHz
中波(MF)	300~3000kHz
短波(HF)	3~30MHz
超短波(VHF)	30~300MHz
甚短波(UHF)	300~3000MHz

## ● 电离层

地球大气层高空 70km~300km 的地方,气体分子受到来自太阳的紫外线、X 射线等宇宙射线的作用而电离成为电子和离子,这就是电离层。电离层主要对短波以下的电波产生反射、吸收和折射作用。电离层的状态随昼夜、季节、太阳黑子活动周期以及纬度的不同而变化。白天,电离层由 D、E、F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 层构成;夜间,D 层消失,F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 层变为一体化的 F 层。下面是电波的传播方式。

- 长波(LF)            ① 长波(LF) 地面波的传播距离长,电离层中的 D 层和 E 层也起反射作用,故可传到很远的地方。
- 中波(MF)            ② 中波(MF) 地面波的传播距离比长波的短,电离层中的 E 层也起反射作用。白天由于 D 层对其衰减很大,故只能达到地面波的传播范围。夜间 D 层消失,故可传播到很远的地方。
- 短波(HF)            ③ 短波(HF) 地面波能到达的距离比中波更短,但能通过 F 层与地面之间多次反射传播到远方。
- 超短波(VHF)  
甚短波(UHF)        ④ 超短波(VHF)和甚短波(UHF) 由于它能穿过电离层,所以不可能利用电离层反射来传播,传播距离基本上为视距范围,即直接波和地面反射波的传播范围。
- 微波                ⑤ 微波 与光的性质相近,具有直线传播的性质,直接波是其主要传播方式。由于波长短,所以下雨、下雪及大雾都会造成电波衰减。反射板或地形对微波的反射或绕射也能用于通信。

图 8.28 示出了电离层的构成和不同频率的电波的传播方式。

## □ 相关知识 ● 异常传播

不按正常传播路径传播称为异常传播,它会对通信造成不良影响。下面是一些典型的异常传播现象。

- 磁暴                ① 磁暴 因太阳磁力线出现异常而影响到整个电离层发生变化,造成全球范围内数日间无法进行短波通信。
- 德林格尔现象        ② 德林格尔现象 受太阳紫外线影响,数分钟至数小时内半个地球不能进行短波通信。
- E 电离层散射        ③ E 电离层散射 夏季里,E 电离层的高度上产生能反射超短波的电离层,使超短波波段电波的传播距离增大,结果对通常的通信带来妨害。
- 大气波导现象        ④ 大气波导现象 伴随着气象状况的变化,大气的折射率发生了变化,大气层中形成了能使微波段电波通过的通道,使电波传播超出了通常的传播范围。
- 涨落现象            ⑤ 涨落现象 两条以上不同路径的电波在接收地点上合成,



由于其相位和强度不同,接收到的电波要么强度产生变化要么信号产生失真。

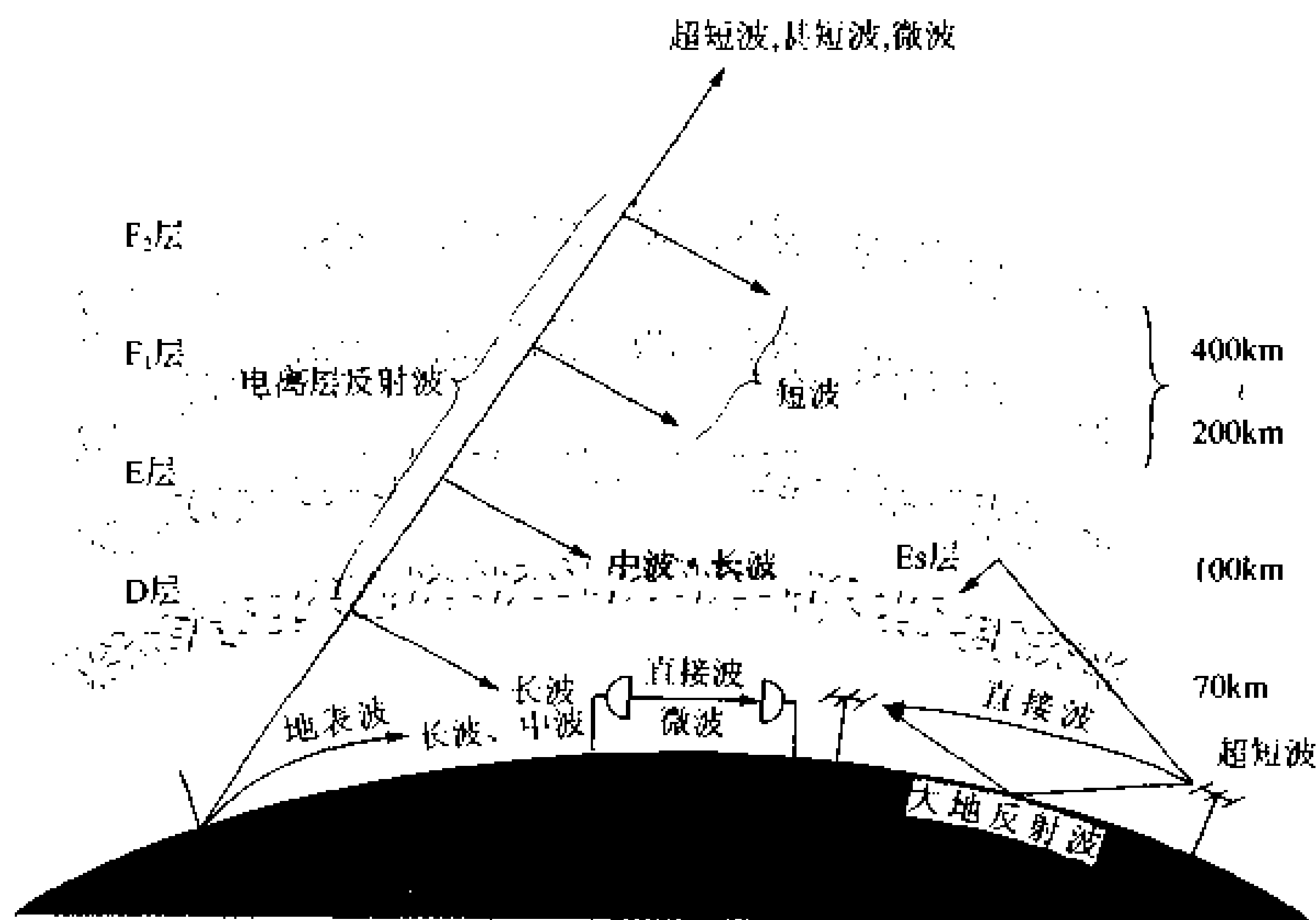


图 8.28 电离层的结构和电波的传播方式

### ● 标准电波

这里所说的标准电波是作为基准的电波信号,也称为 JJY,是日本邮政省用于维护管理而发射的电波(频率分别为 5MHz、8MHz、10MHz),包括呼叫信号、报时信号(莫尔斯电码和声音)和电波状况通报信号(莫尔斯电码)。电波状况通报信号的种类和含义如下所示:

N(莫尔斯码为: · · ·):表示电波传播状况稳定;

U(莫尔斯码为: · · · —):预料不稳;

W(莫尔斯码为: · · · — —):有异常。

# 8 无线通信方式

## □ 要 点

无线通信方式在长波到微波范围内的各种通信方式中都有所应用,其分类方法也很多。两点间的无线电台通信有单工方式和双工方式之分,而双工方式又有半双工和全双工两种;按调制方式分类时,通信方式有 AM 式(幅度调制)、FM 式(频率调制)、PM 式(相位调制)等;此外,也可按频段分为短波通信、超短波通信、微波通信等。

## □ 解 释

单工方式

双工方式

半双工通信方式

## ● 单工方式和双工方式

如图 8.29(a)所示,单工方式是两地之间共用同一频率且只能 A 发 B 收或者只能 B 发 A 收的通信方式,这种方式多用于测量数据传输等方面。双工方式可以进行 A、B 之间的相互通信,其中图 8.29(b)①所示的共用一个频率交互通信的方式称为半双工通信方式,图 8.29(b)②所示的用互不相同的 2 个频率同时通信的方

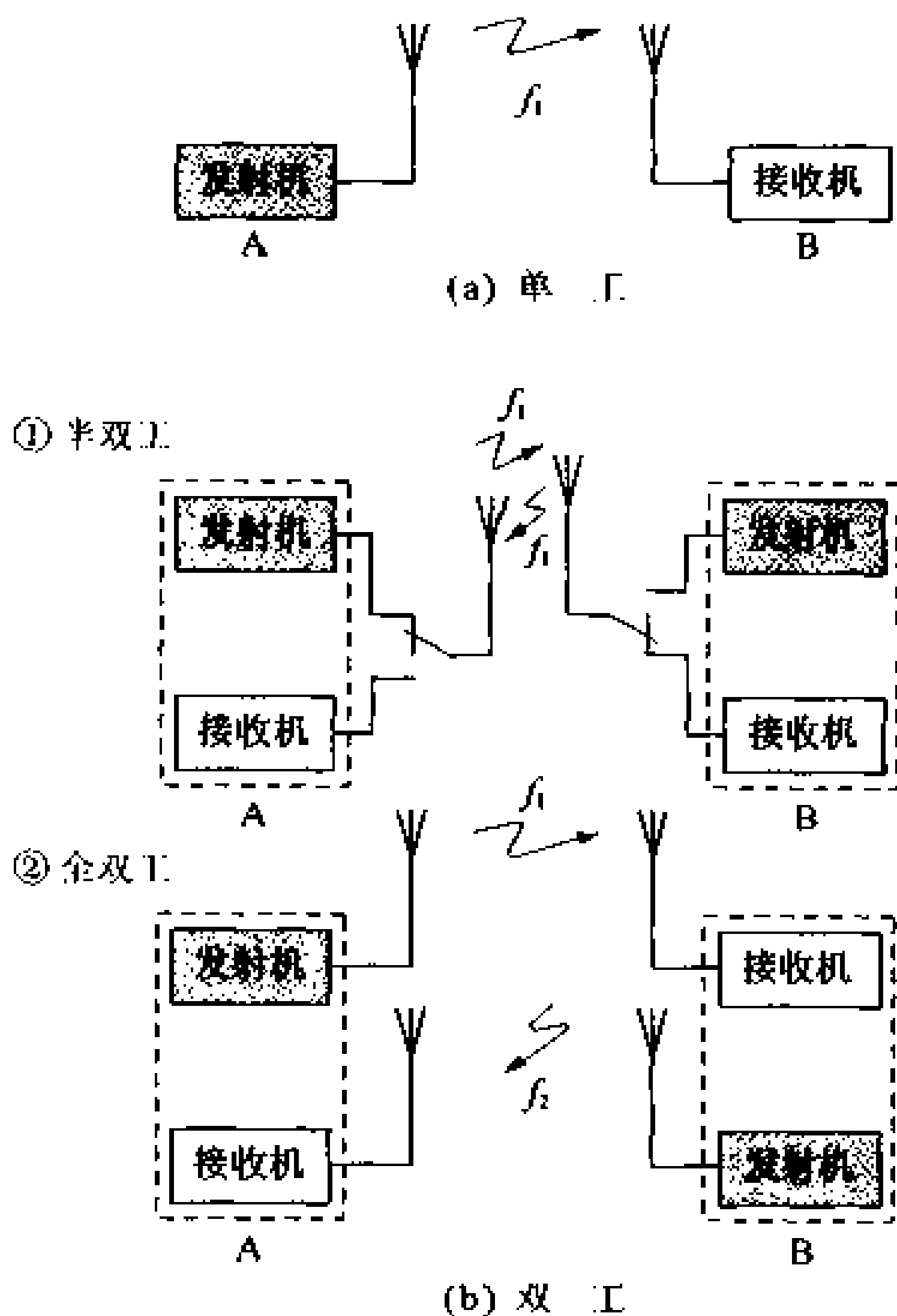


图 8.29 单工方式和双工方式

## 全双工通信方式

式称为全双工通信方式。用无线电收发两用机交互进行的通信是半双工方式,能同时相互通话的汽车电话是全双工方式。

### ● 调制方式(AM、FM、PM)

如图 8.30 所示,通信电波是由载波和信号共同构成的。用声音或图像等信号改变载波的过程称为调制,从被调制过的载波中取出信号的过程称为解调或检波。如果用  $i = I_m \sin(2\pi ft + \theta)$  来表示载波,即可知载波  $i$  是按振幅  $I_m$ 、频率  $f$  和相位  $\theta$  三个要素变化的。把信号变成载波振幅变化来传送的方式是 AM(振幅调制)方式,把信号变为载波频率变化来传送的方式是 FM(频率调制)方式,把信号变成载波相位变化来传送的方式是 PM(相位调制)方式。

AM(振幅调制)

方式

FM(频率调制)

方式

PM(相位调制)

方式

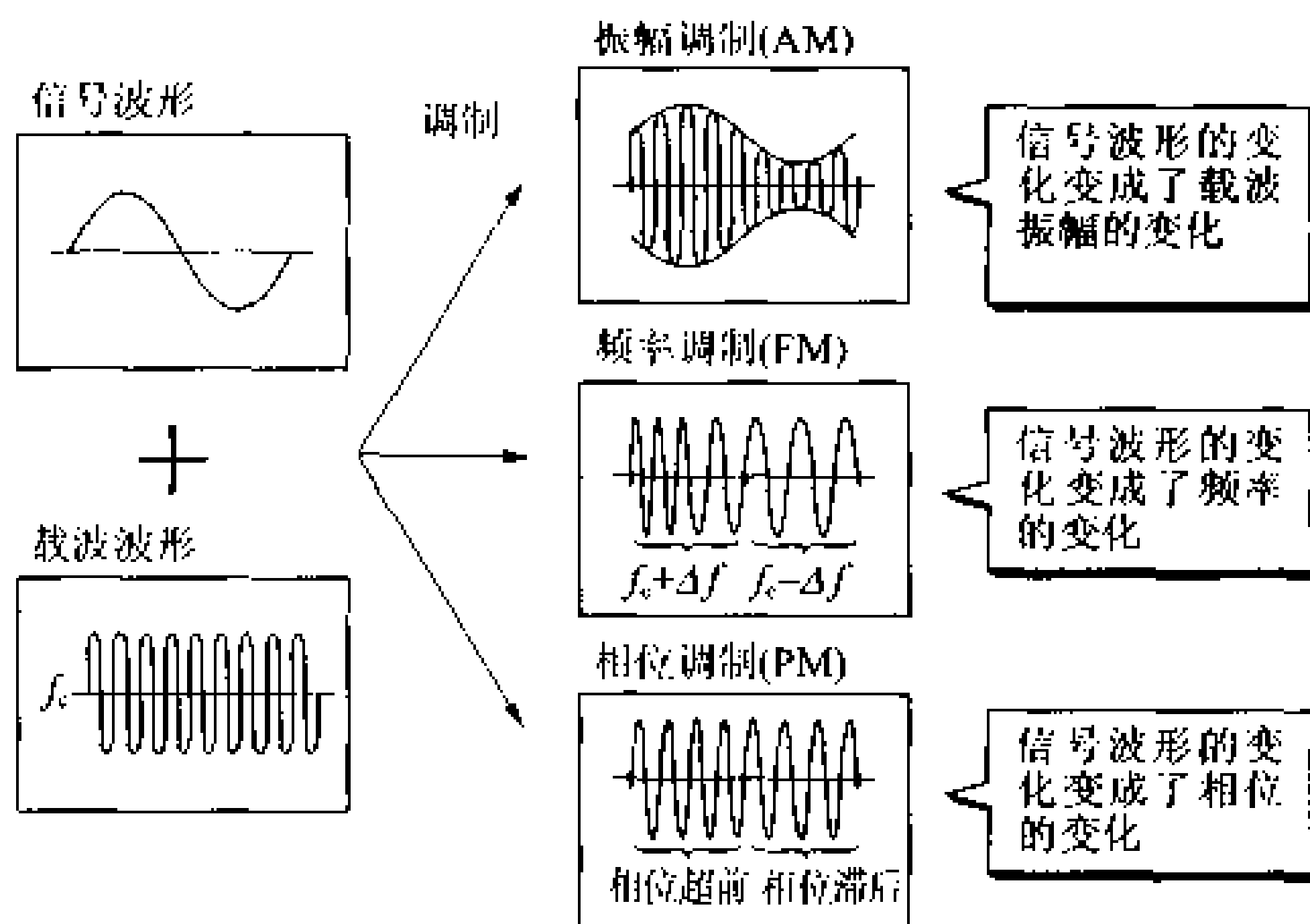


图 8.30 AM、FM 和 PM 调制

## □ 相关知识 ● 无线电台

除去只以接收电波为目的的那一部分(指天线设施)外,无线电设备及其操作管理部分的总称被叫做无线电台。无线电台按其用途可分为地面电台、移动电台、便携电台、船用电台、应急电台、实验电台、地面站、业余电台等。

### ● 特定小功率无线电台

在天线功率小于 10mW 的无线台中,符合日本邮政省颁布的技术标准并取得证明的无线电台属于特定的小功率无线电台,这种电台和从业人员不需要经过政府部门的批准。

● 无线电从业人员

无线电台的建台、管理和使用,其电台和从业人员都得经过政府有关部门的批准。按照无线电台的种类和无线电从业人员许可证的类别,天线功率和频率等都有其规定的允许使用范围。典型的从业人员资格有:综合无线电话务员(1、2级)、地面无线电技师(1、2级)、特种无线电技师、业余无线电技师(1~4级)。

● 电波的标志格式

图 8. 31 是电波法实施标志格式的示意图。它是按电波的主载波调制方式、调制主载波的信号的性质及传送信息的类型分类的。例如,无线电广播的标志是 A3E,调频电话的标志是 F3E,传真(振幅调制)的标志是 A3C。

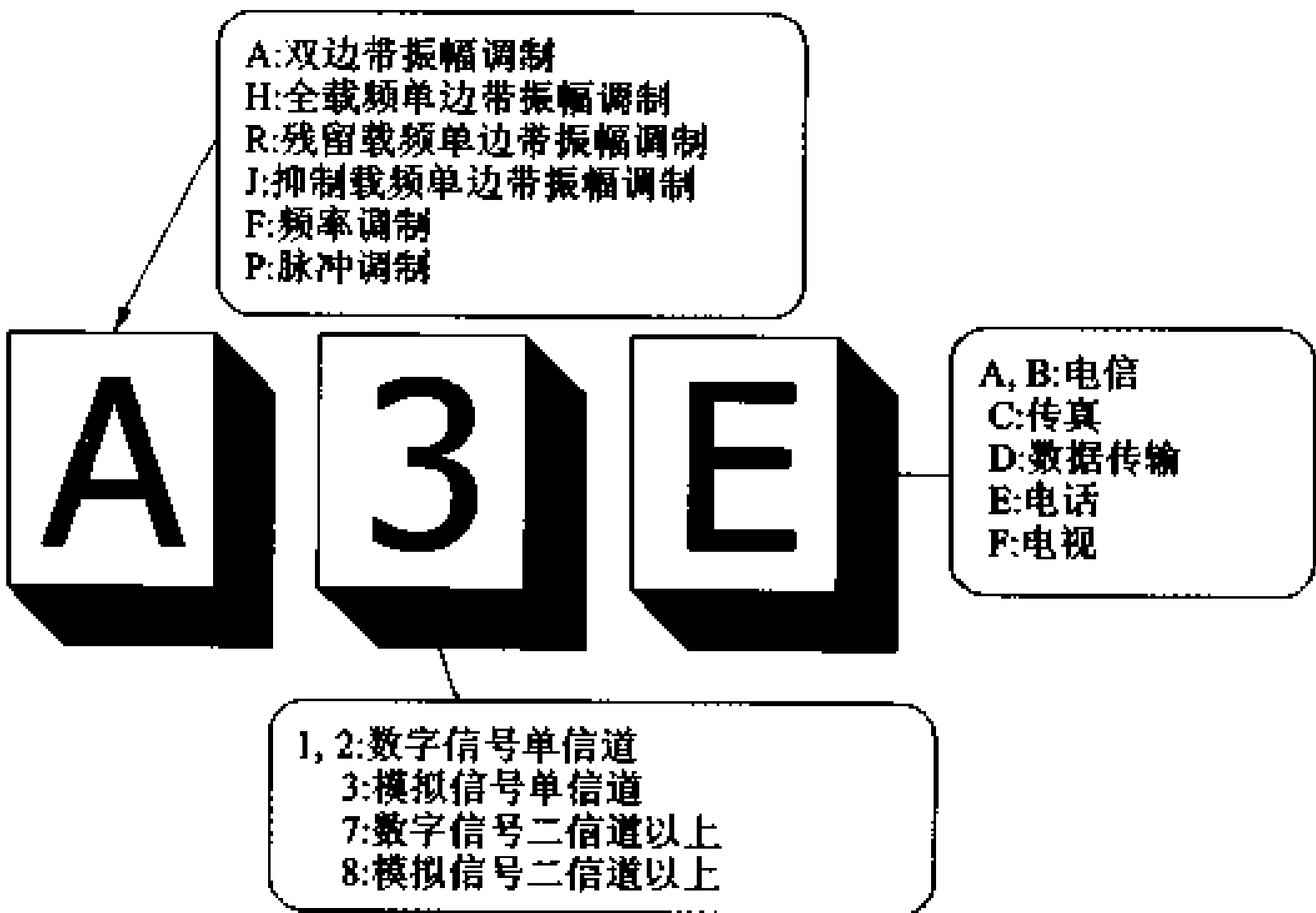


图 8. 31 电波的标志格式

## 9 发射机和接收机

### □ 要点

能将声音、图像、计算机数据等信号变为已调制的电波或光波并发射出去的装置叫做发射机。从收到的载波解调(检波)出原来信号的装置叫做接收机。

### □ 解释

振荡器 倍频器

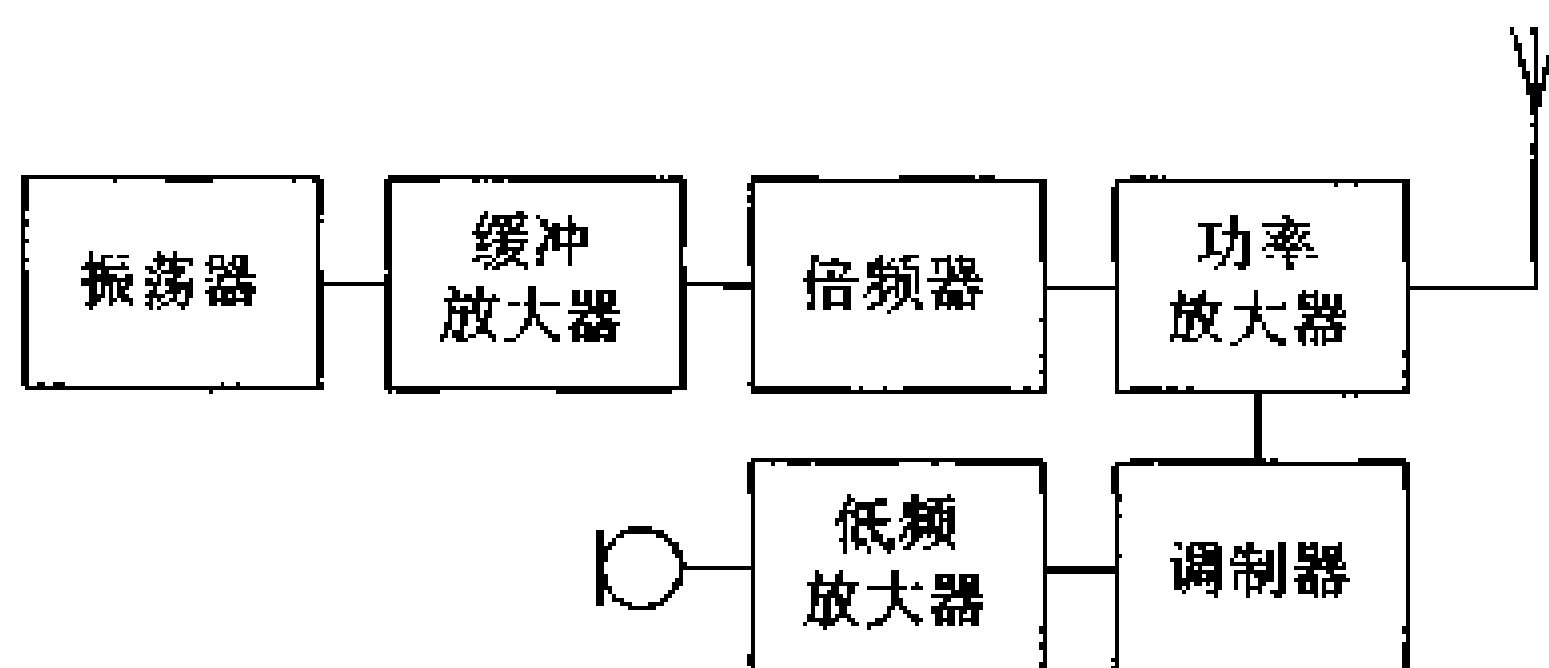
调制器

功率放大器

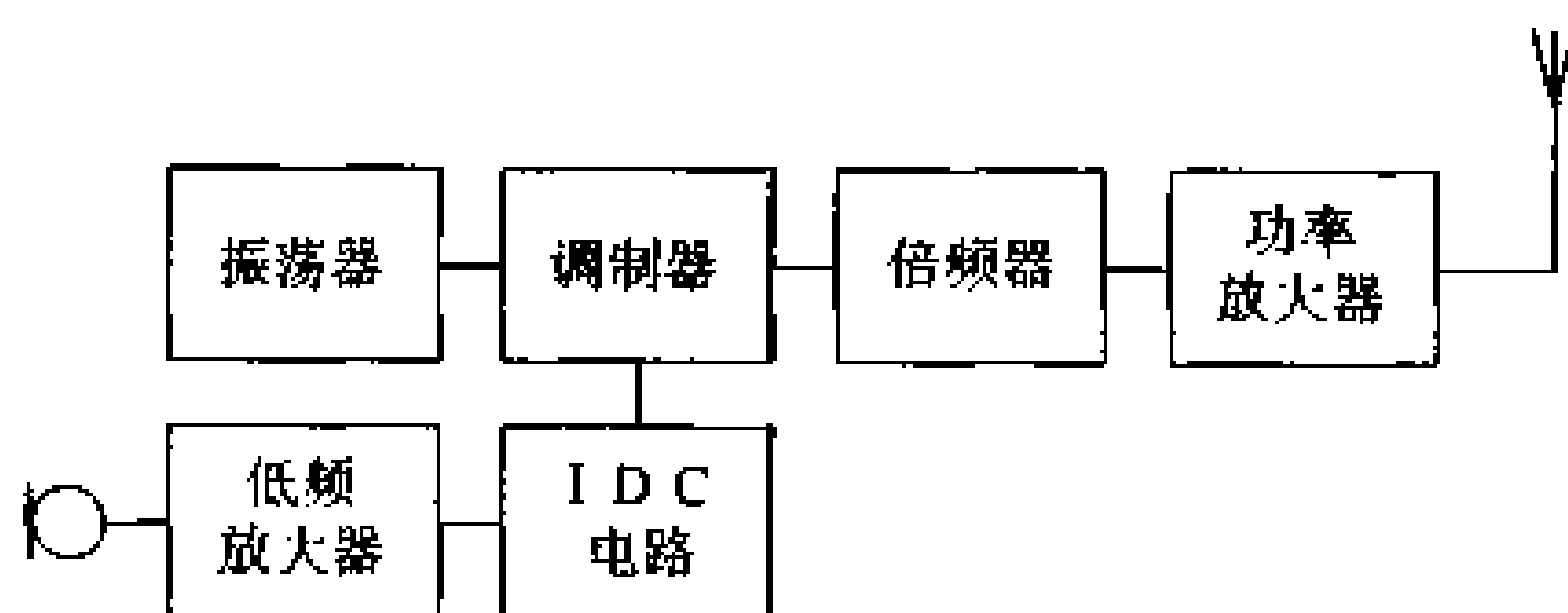
### ● 发射机的构造和性能

发射机由产生基准频率的振荡器、提高频率的倍频器、把信号调制到载波上的调制器和功率放大器组成。

对发射机性能的要求有:频率准确稳定、寄生发射少、占有频带足够窄、能达到所需的发射功率等。图 8.32 示出 AM 发射机和 FM 发射机的构成。



(a) AM电话发射机的构成



(b) FM电话发射机的构成

图 8.32 发射机的构成

### ● 接收机的构成和性能

直接高频放大式

超外差式

接收机的构成有图 8.33(a)所示的直接高频放大式和图 8.32(b)所示的超外差式两类。直接高频放大式接收机是对收到的电波直接加以放大后再进行检波和低频放大,超短波以下的频段很少采用;超外差式接收机是把收到的电波先变成称为中间频率的较低频率,然后进行中频放大和检波,因而灵敏度高,选择性好。

接收机的性能指标有：灵敏度（接收机可能接收到的电波的强度）、选择性（接收机选择想要接收电台的能力）、稳定性（接收机长时间稳定地接收具有一定频率和一定强度的电波的能力）、保真度（接收机忠实再现所接收信号的能力）和内部噪声（越小越好）等。

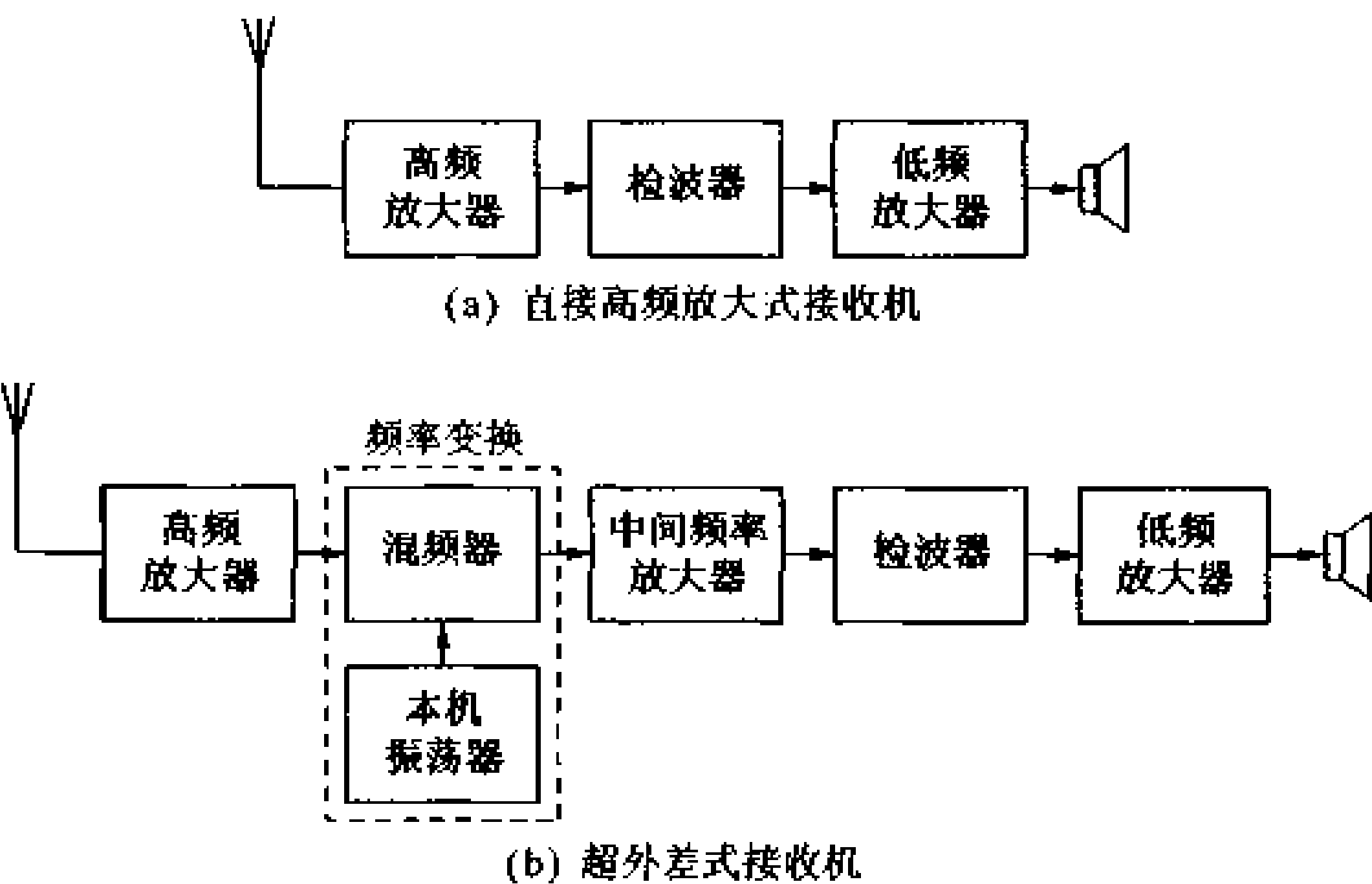


图 8.33 接收机的构成

相关知识 ● 振幅调制(AM 及 SSB)

调制系数

图 8.34 是振幅调制的波形。调制的程度用调制度或调制系数来表示。当用正弦信号( $f_c$ )对载波( $f_s$ )进行振幅调制时,其频谱如图 8.35(a)所示。当用声音等信号进行振幅调制时,由于声音信号的频谱较宽,所以已调信号的频谱如图 8.35(b)所示。

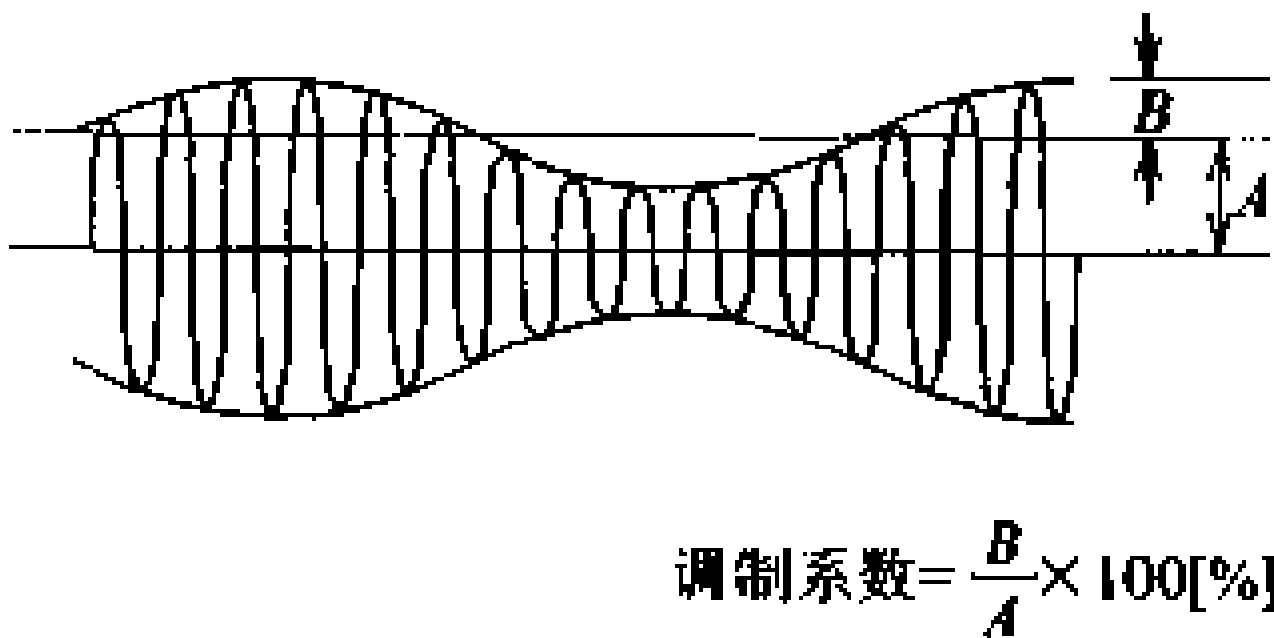
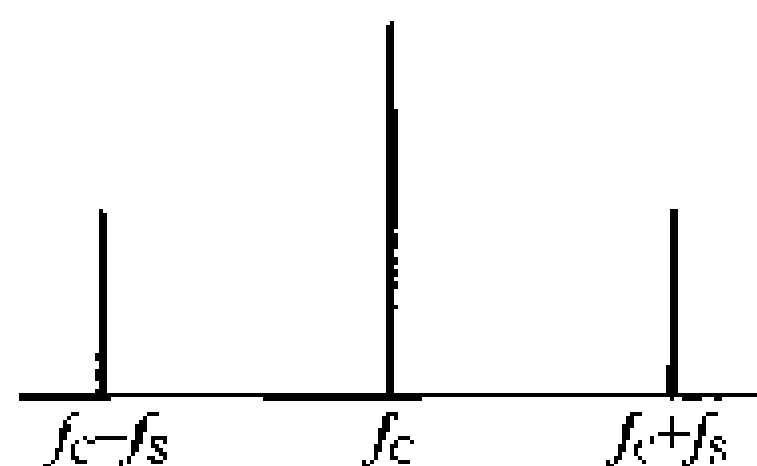


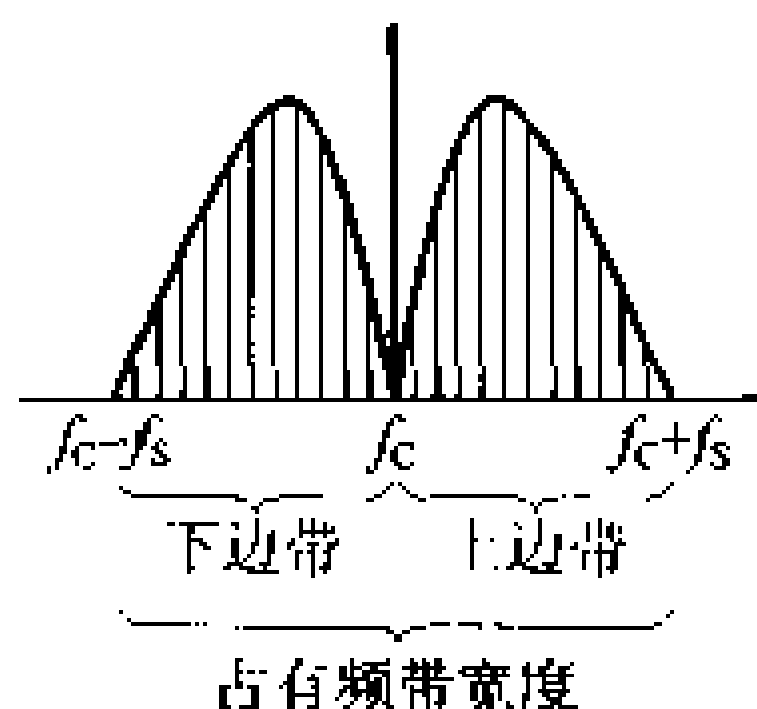
图 8.34 振幅调制的波形及调制系数

AM-DSB  
AM-SSB

以载波频率为中心,将上边带和下边带全部发送出去的方式称为 AM-DSB(双边带振幅调制),只发送上边带或下边带的方式称为 AM-SSB(单边带振幅调制)。SSB是通过环形调制器把载波



(a) 单正弦调制的频谱



(b) 用声音信号调制时的频谱

图 8.35 振幅调制的频谱

频率抑制掉,再用滤波器滤去上边带或下边带来获得的。

### ● 频率调制(FM)与 IDC 电路

频率调制就是用信号的振幅改变载波的频率。当信号振幅变大时,频率偏移增大,占有频带变宽。因此,常用 IDC(瞬时频偏限制)电路将频率偏移限制在一定的范围内。调频信号的频谱比较复杂。

### ● 调幅波的解调(检波)

双边带调幅波的检波方式有两种,一种是二极管线性检波,其输出电流与输入电压为线性关系;另一种是二极管平方律检波,其输出电流与输入电压的平方成比例。单边带调幅波的解调是通过环形解调器把本机振荡器的输出频率混合到检波器中来得到音频分量的。

### ● 调频波的解调(检波)

调频波的解调是先用限幅器使调频波的振幅保持恒定,然后将频率的变化变成电压幅度的变化,称之为频率鉴别器或简称鉴频器。鉴频器有比例鉴频电路和福斯特-西利鉴频电路等不同的电路形式,福斯特-西利鉴频电路能得到比比比例鉴频电路大一倍的鉴频输出。

线性检波

平方律检波

频率鉴别器

# 10 天 线

□ 要 点

天线是向空间发射电波或从空间接收电波的装置。电波具有波的性质,它能在长度等于  $1/2$  波长的导体中产生共振。天线辐射电波的特性具有某种方向性,半波长天线的方向性呈纺锤形, $\lambda/4$ 接地天线没有方向性。辐射电波在某个特定方向上较强的天线称为方向性天线,八木-宇田天线和抛物面天线都是方向性天线。

□ 解 释 ● 天线的工作原理

图 8.36 是天线辐射电波的情形。当给半波长天线导体的中点加上高频电流(电压)时,导体上就会有高速往复运动的正电荷和负电荷。电荷移动产生电力线和与之正交的磁力线。于是,伴随着电荷的往复运动,电力线和磁力线便成为闭合曲线而被推挤到空间中去。

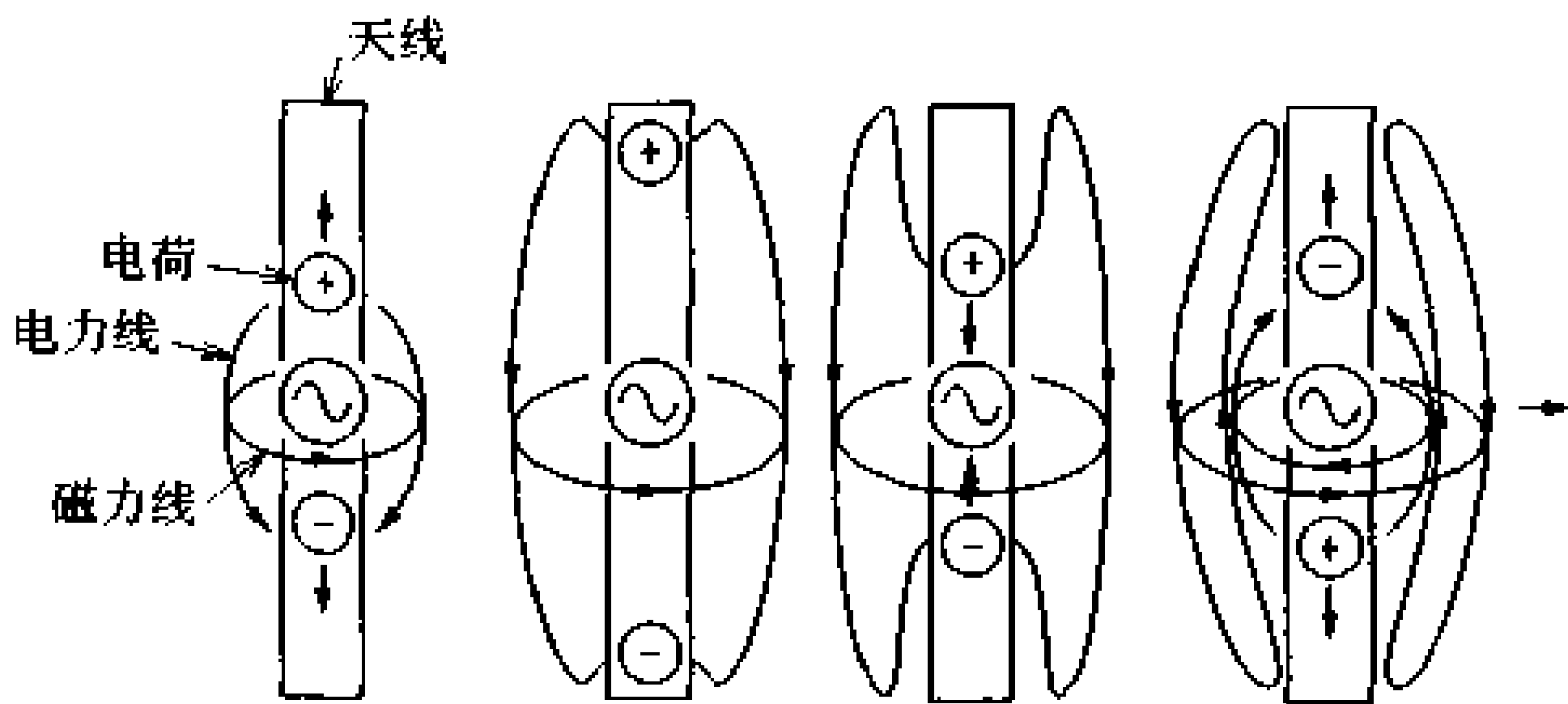


图 8.36 天线发出电波的情形

● 天线的种类和方向性

图 8.37(a)示出半波长天线的方向性,图 8.37(b)示出  $\lambda/4$  接地天线的方向性。

图 8.37(c)的八木-宇田天线是在半波天线的前方增设了一个称为导波器的略短于  $\lambda/2$  的导体,后方增设了一个称为反射器的略长于  $\lambda/2$  的导体而构成的,具有指向导波器前方的方向性。

图 8.37(d)的抛物面天线能把电波收集到抛物面的焦点上,多用于微波波段。它具有尖锐的方向性,但缺点是对于较长的波长,天线体积太大。

半波长天线  
 $\lambda/4$  接地天线  
八木-宇田天线

抛物面天线



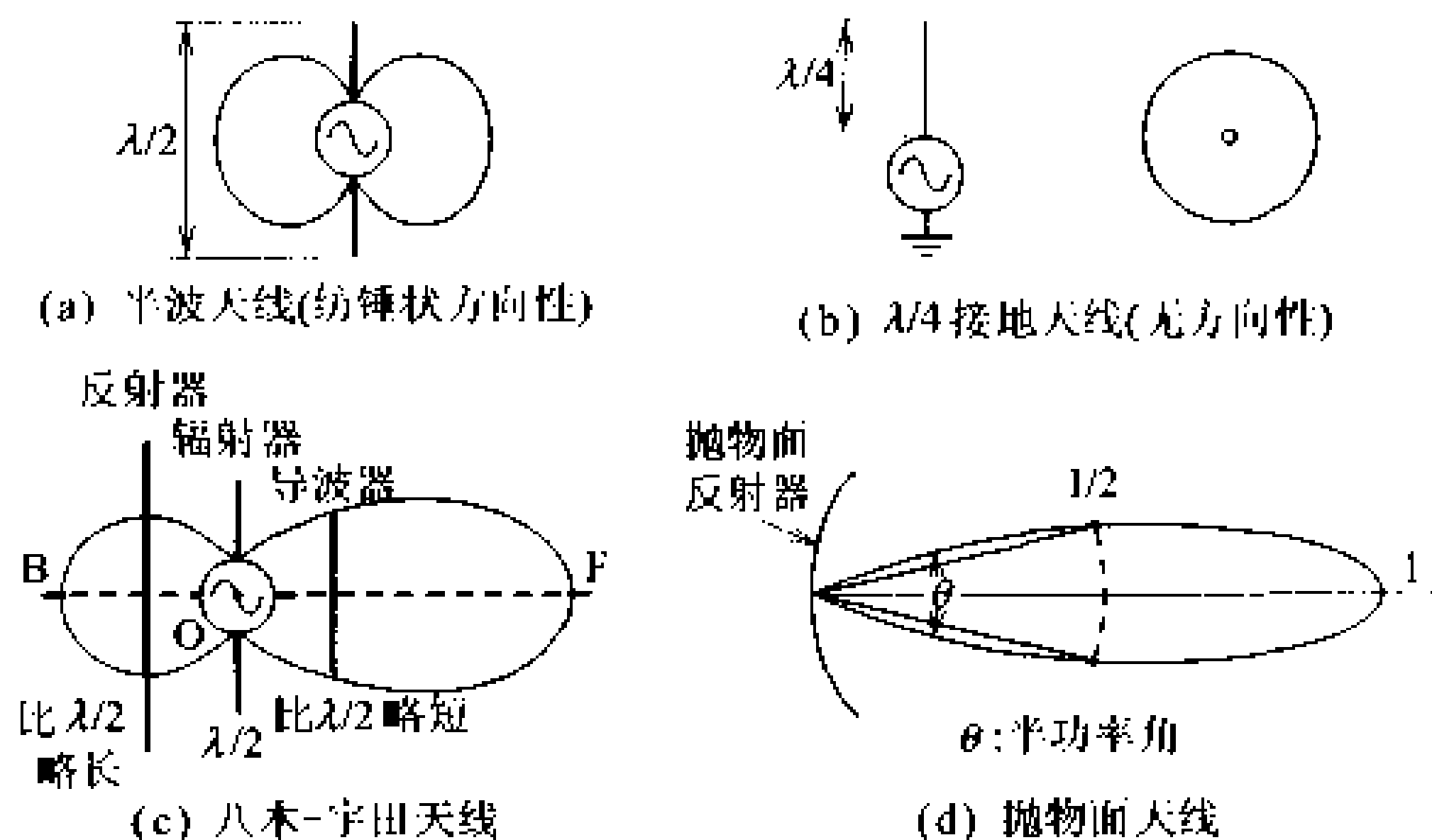


图 8.37 各种天线及其方向性

## □ 相关知识 ● 极化波

水平极化波  
垂直极化波  
圆极化波

电波在传播过程中磁场始终与电场正交。电场方向与地面平行的电波称水平极化波,与地面垂直的称为垂直极化波。由水平极化波与垂直极化波相组合所形成的电场和磁场边旋转边向前传播的电波,称为圆极化波。圆极化波又有左旋圆极化波和右旋圆极化波之分。

## ● 等效长度和等效高度

等效长度  
等效高度

当用频率等于天线谐振频率的高频信号激励半波长天线时,天线上将产生图 8.38 所示的正弦状驻波电流。若将其等效为图 8.38 所示的均匀分布电流,则其等效长度在半波长天线中称为等效长度( $l_e$ ),在  $\lambda/4$  接地天线中称为等效高度( $h_e$ )。设半波长( $\lambda/2$ )为  $l$ , $\lambda/4$  为  $h$ ,则  $l_e$  和  $h_e$  可由(8.2)、(8.3)两式算出:

$$l_e = 2l/\pi = 0.64l \quad (8.2)$$

$$h_e = 2h/\pi = 0.32h \quad (8.3)$$

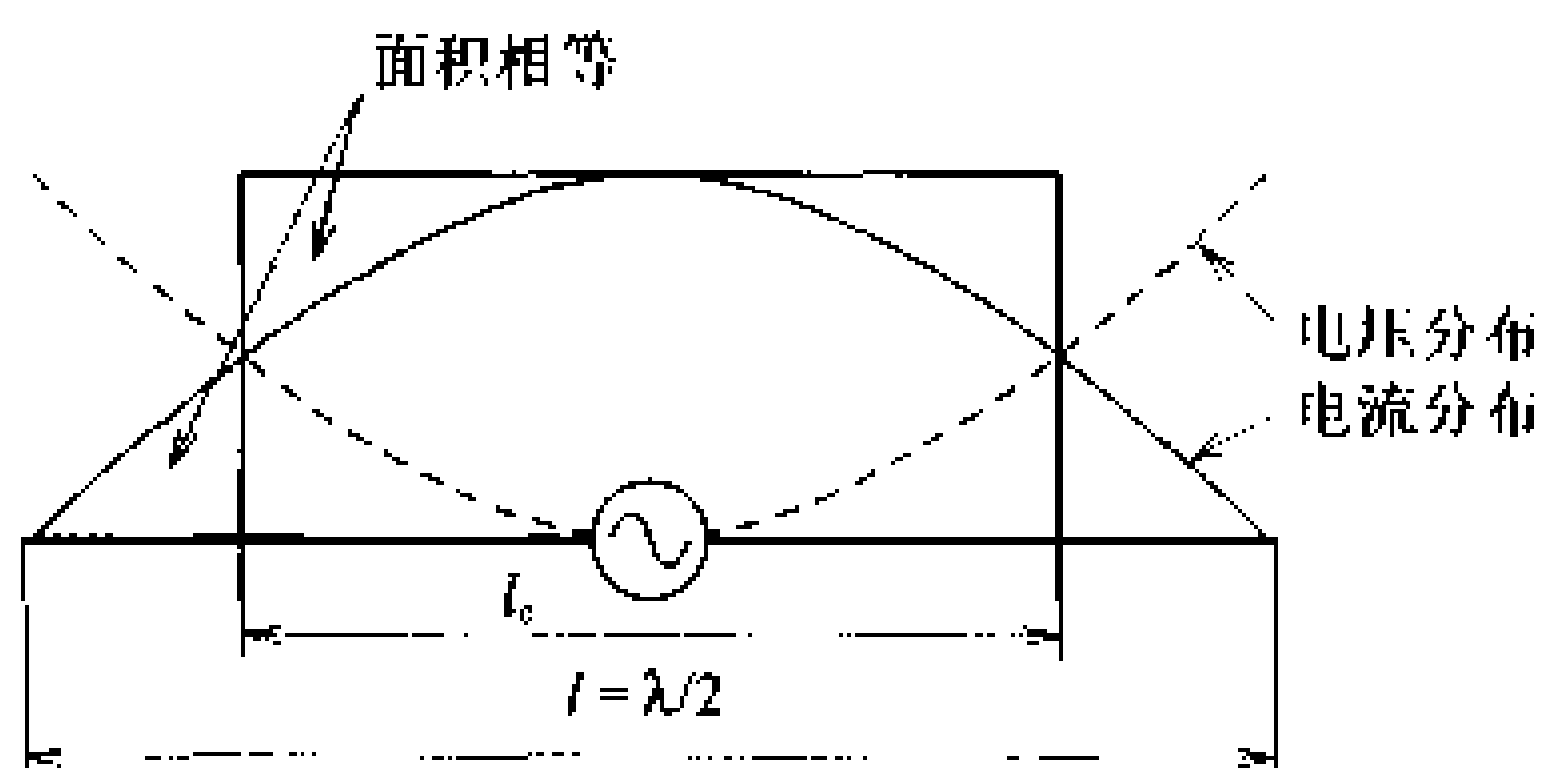


图 8.38 电压、电流分布与等效长度

电场强度

● 电场强度

设天线等效长度每米上的感应电压为  $1\mu\text{V/m}$ , 以此作为基准, 用 dB 来表示电场  $E[\mu\text{V/m}]$ , 称之为**电场强度**。

$$20 \lg \frac{E [\mu\text{V/m}]}{1 [\mu\text{V/m}]} = 20 \lg E [\text{dB}] \quad (8.4)$$

● 馈线的种类及特征阻抗

发射机和接收机都要用馈线与天线连接。馈线必须与天线阻抗相匹配。半波天线的阻抗为  $73.13\Omega$ ,  $\lambda/4$  接地天线的阻抗为  $36.6\Omega$ 。图 8.39 示出馈线的形状与特征阻抗的关系。

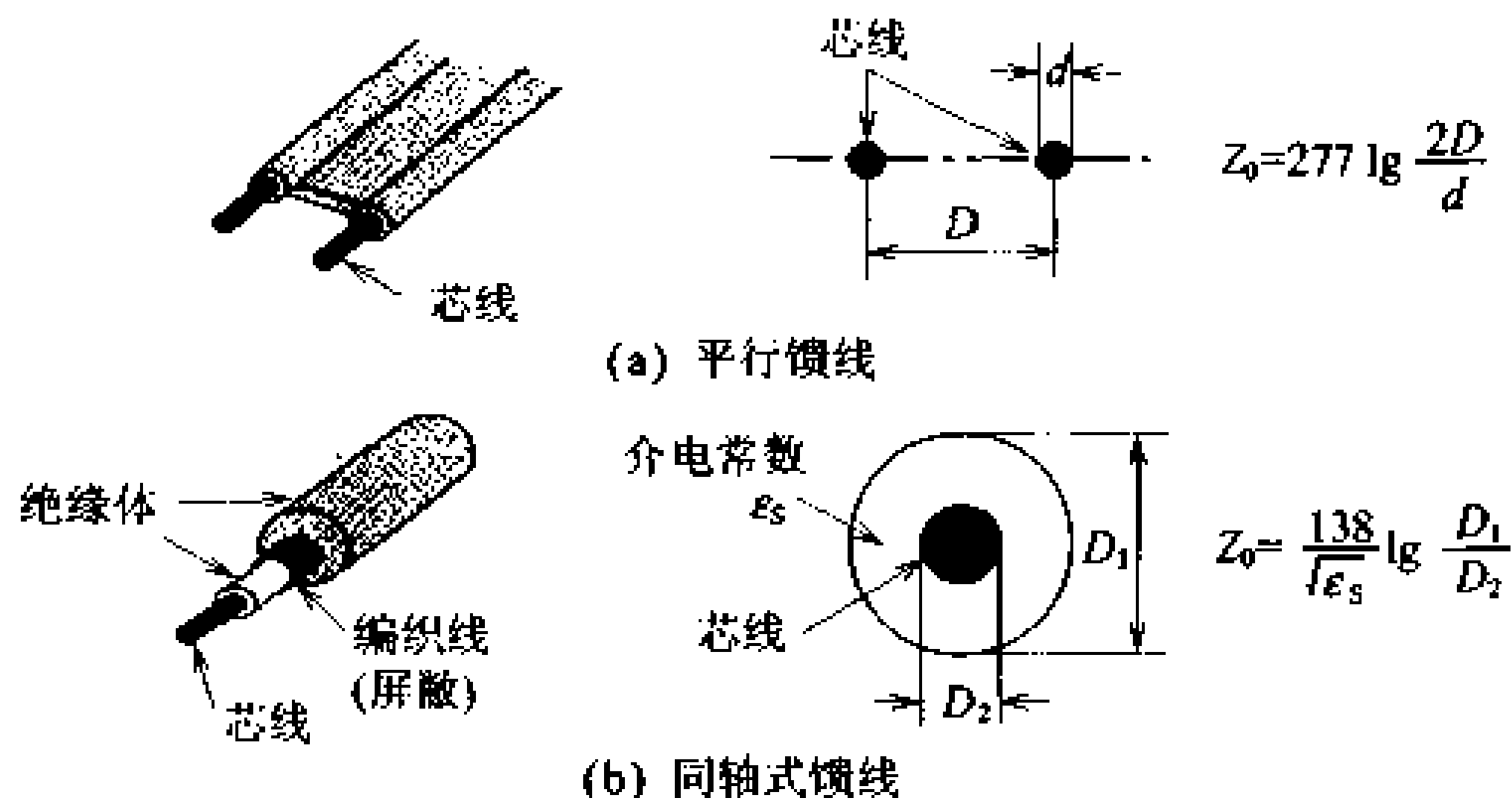


图 8.39 馈线的形状和特征阻抗

● 天线性能用语

半功率角

① **半功率角** 在天线的方向性中, 设最大辐射方向上的功率密度为 1, 则辐射功率密度为  $1/2$  的两个方向之间的夹角  $\theta$  就是半功率角。半功率角的值越小, 表明天线的方向性越强(参见图 8.37(d))。

F/B

② **F/B** 定向天线的前方电场强度与后方电场强度之比 (front to back ratio) (参看图 8.37(c))。

$$F/B = 20 \lg \frac{OF(\text{前方电场强度})}{OB(\text{后方电场强度})} [\text{dB}] \quad (8.5)$$

增益

③ **增益** 一般是指待测天线与标准天线所发射的电波, 在离天线一定距离的某点上产生相同电场强度所需要的天线功率之比。其中的标准天线经常由半波天线来担当。

$$G = 10 \lg \frac{\text{标准天线的输入功率 } P_0}{\text{待测天线的输入功率 } P} [\text{dB}] \quad (8.6)$$

# 11 微波通信

## □ 要 点

微波一般是指频率在 UHF 波段以上的电波,并无严格定义。微波的波长较短,与光的性质相近,具有直线传播特性,能穿过电离层而不被反射。以视距传输为主,长距离通信需要用中继站。不易受外来噪声影响,但下雨下雪时衰减很大,也容易受建筑物和地形的影响。由于其频带宽,所以在电视中继、无线多路通信和卫星通信等方面得到广泛应用。所用天线为抛物面天线和多单元八字天线等方向性强的天线。

## □ 解 释 ● 视 距

微波的传输距离仅限于视距,其距离  $D$  可用(8.7)式来计算。长距离传输中必须每  $30\text{km} \sim 50\text{km}$  设一中继站。图 8.40 为微波通信的例子。

$$D \approx 4.12(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) [\text{km}] \quad (8.7)$$

$h_t$ : 发送天线高度[m]

$h_r$ : 接收天线高度[m]

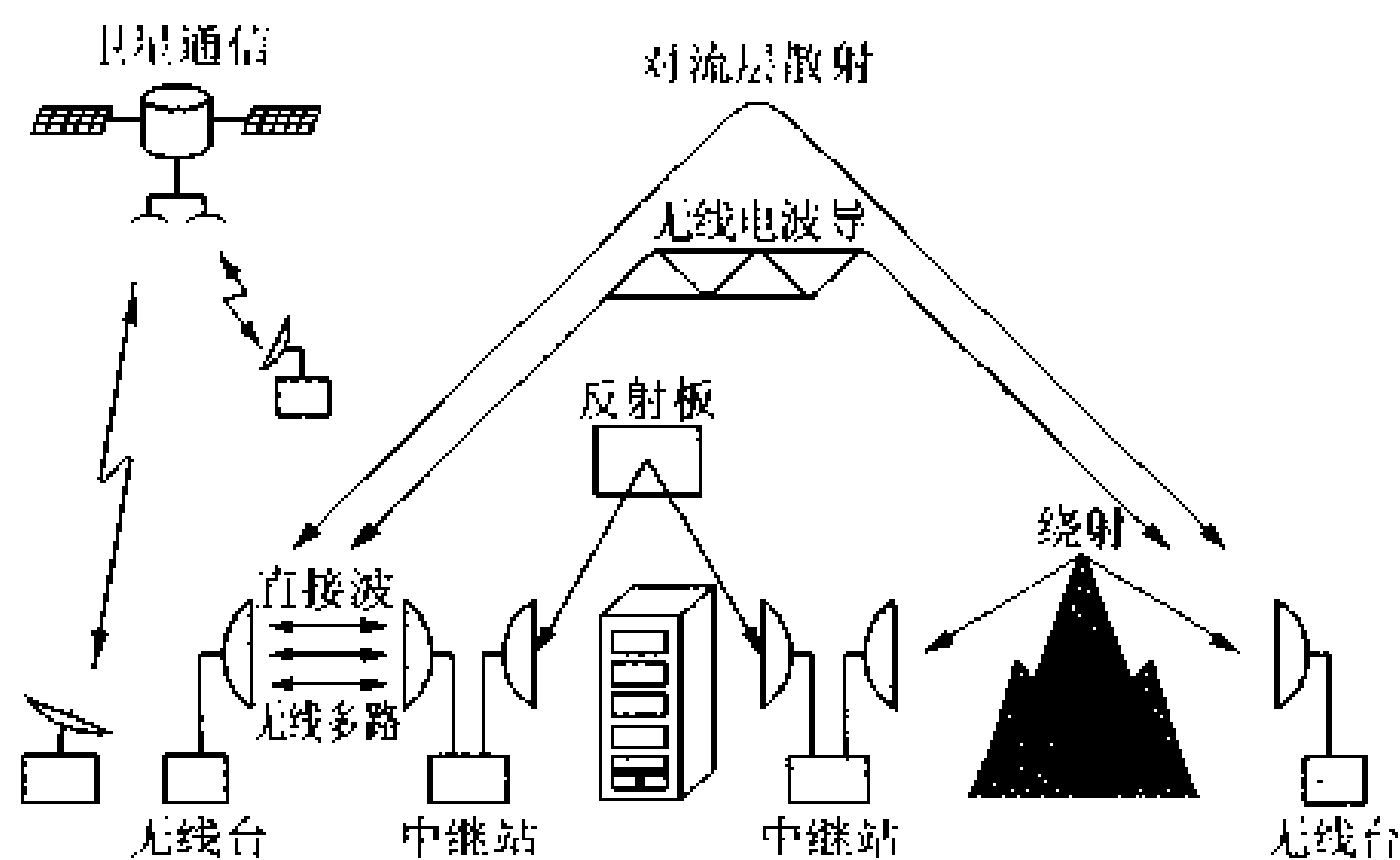


图 8.40 微波通信

## ● 多路通信方式

时分多路复用  
频分多路复用

多路通信有时分多路复用和频分多路复用等方式。时分多路复用是用同一电波频率按时间分割来传送多个信号,频分多路复用是用同一电波频率按时间分割来传送多个信号。时分多路复用方式中有采用脉冲波形的 PPM-AM 方式等,频分多路复用方式中

有将 SSB 调制后的复用信号再进行一次 SSB 调制的 SS-SS 方式和将 SSB 调制后的复用信号再进行频率调制(或相位调制)的 SS-FM(或 SS-PM)方式。

### ● 中继方式

外差中继方式

① 外差中继方式 是将接收到的微波信号变换成中间频率并进行放大,然后再变换成微波发送出去的方式。

检波(再生)中继方式

② 检波(再生)中继方式 是将接收到的微波通过检波恢复成原信号,然后再用所恢复的原信号对微波进行调制后发射出去的方式。

直接中继方式

③ 直接中继方式 直接将接收到的微波加以放大(不经过中间频率变换)后发射出去的方式。

无电源中继方式

④ 无电源中继方式 是用反射板或者把收、发天线直接连起来进行中继的方式。

### ● 视距以外的传输

对流层散射通信

当微波通过对流层时,一部分能量产生散射现象,利用这一现象可进行对流层散射通信,目前已经实用化。此外,大气折射率变化会形成无线电波导,利用这一现象也能使电波传播到视距以外的地方。

## □ 相关知识

### ● 微波振荡

磁控管

微波振荡中,既有用半导体管的,也有用电子管的。半导体管中,雪崩二极管输出功率大;耿氏二极管虽然输出功率小,但噪声小。电子管中,常用的是磁控管。如图 8.41 所示,磁控管的电极结构是阴极被一圈谐振腔所包围,谐振腔起着与  $L$  和  $C$  相同的作用,阴极发出的电子受磁场力的作用在腔体中旋转而感应出微波。磁控管虽然振荡频率范围小,但管体小,输出功率大。

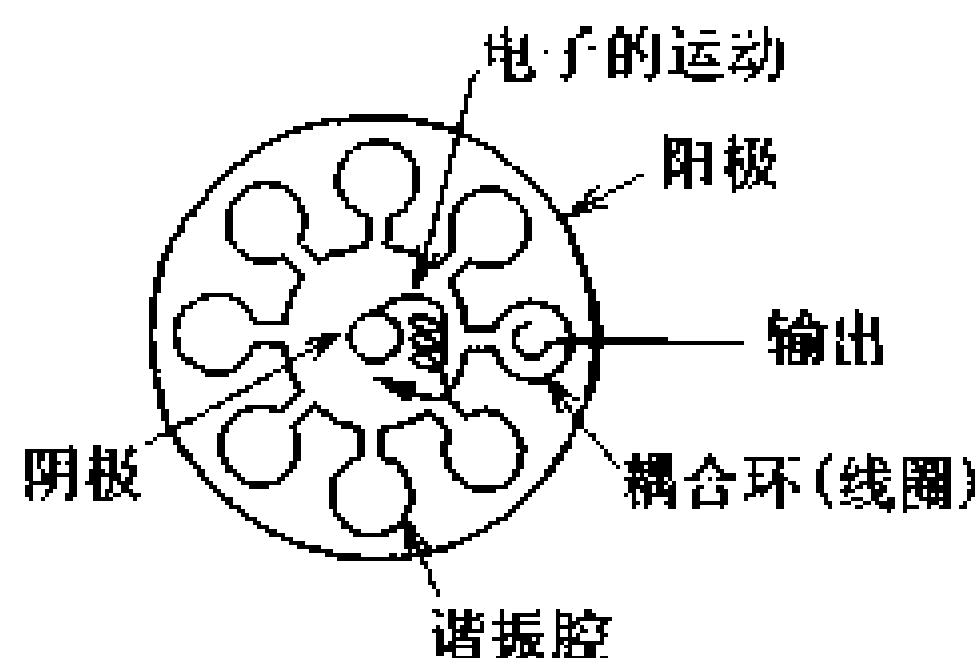


图 8.41 磁控管的电极

## 行波管

## ● 微波放大

小功率微波放大可采用半导体管,较大功率的放大则要用行波管(TWT)。输入的微波沿着图 8.42 所示的管内螺旋状滞波电路传播,当遇到同时从电子枪发出的电子束时,形成疏密状态,平均速度降低。这时,电子能量就使微波的电场和磁场增强,起到放大作用。

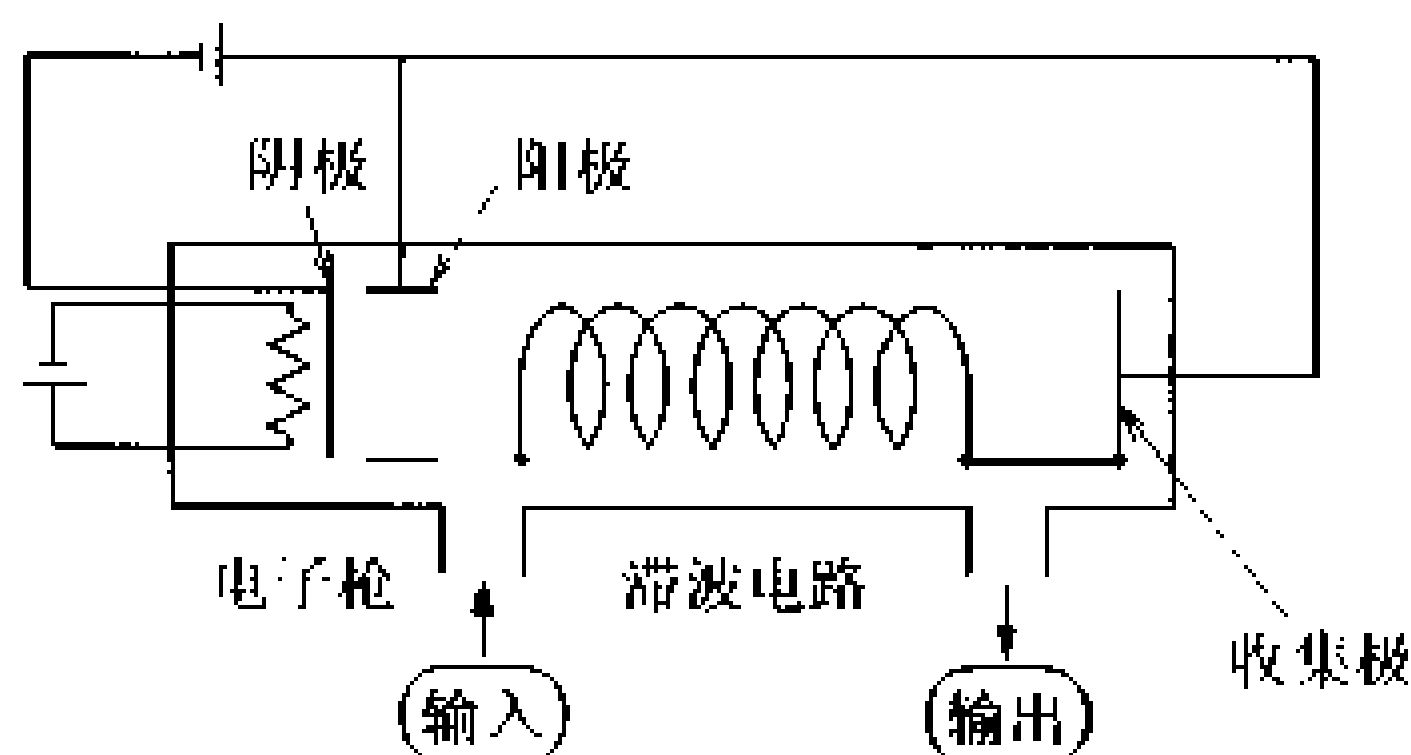


图 8.42 行波管的构造

## ● 波导管

微波系统中,联接天线与发射机的不是馈线,而是具有图 8.43 所示结构的波导管,它能传播截止波长  $\lambda_c = 2a$  以下的频率。

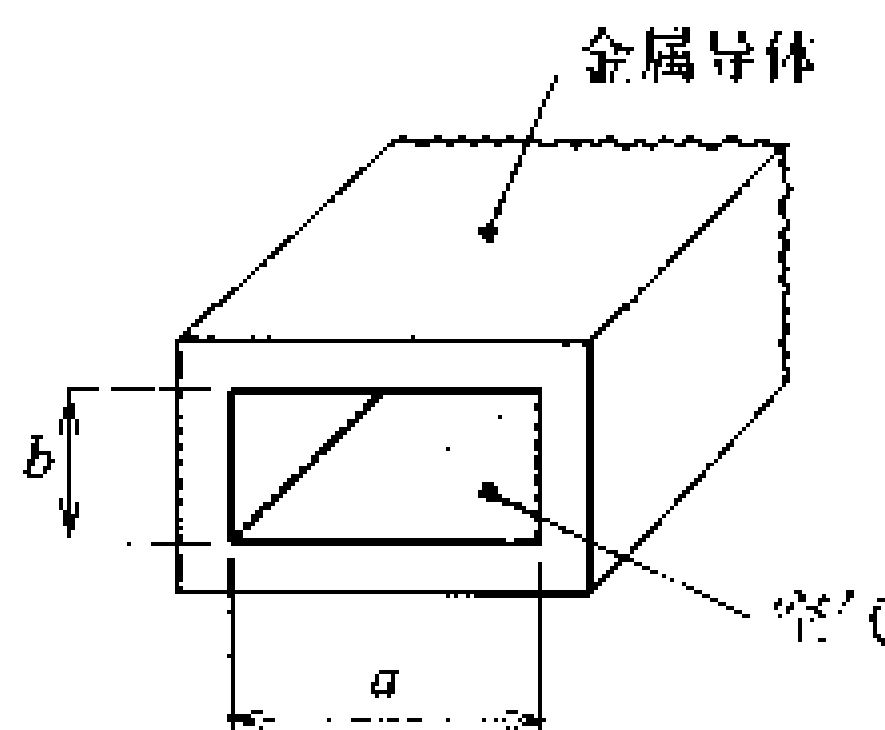


图 8.43 波导管的截面

## ● 抛物面天线

微波通信中广泛使用着增益大、方向性强的抛物面天线。设抛物面天线开口面直径为  $D$ , 波长为  $\lambda$ , 则半功率角  $\theta$  可得:

$$\theta = 70 \frac{\lambda}{D} [^\circ] \quad (8.8)$$

## 12 卫星通信

### □ 要 点

卫星通信是指利用在赤道上空 35800km 轨道上与地球同步旋转的静止卫星或绕地球转动的轨道卫星(非同步)作为中继站来进行的通信。通信卫星有两类,一类是被动卫星,它只能直接把地面站发来的电波反射回地面;一类是主动卫星,上面安装着一种称为脉冲转发器的卫星中继器,由它对来自地面站的电波进行频率变换并加以放大后再重新发射回地面。理论上讲,用三颗静止卫星就能实现全球通信,具有广域性和多址性的优点。其缺点是电波在地球与卫星之间往返会产生时间延迟。卫星通信中所用的频率为 1GHz~10GHz 微波波段,一般称为电波窗。

### □ 解 释 ● 静止卫星与轨道卫星

如图 8.44 所示,绕地球旋转的卫星有静止卫星和轨道卫星(非同步)两类。静止卫星以与地球自转相同的周期旋转,从地球上看去,它处于静止不动的状态,因而适合于作为电话和电视的中继通信卫星。静止卫星以外的轨道卫星,其转动周期与地球自转无关,一颗卫星就能扫描复盖全世界,但从地球上所能看到的位置和时间各不相同,常用于地球勘察和测量。

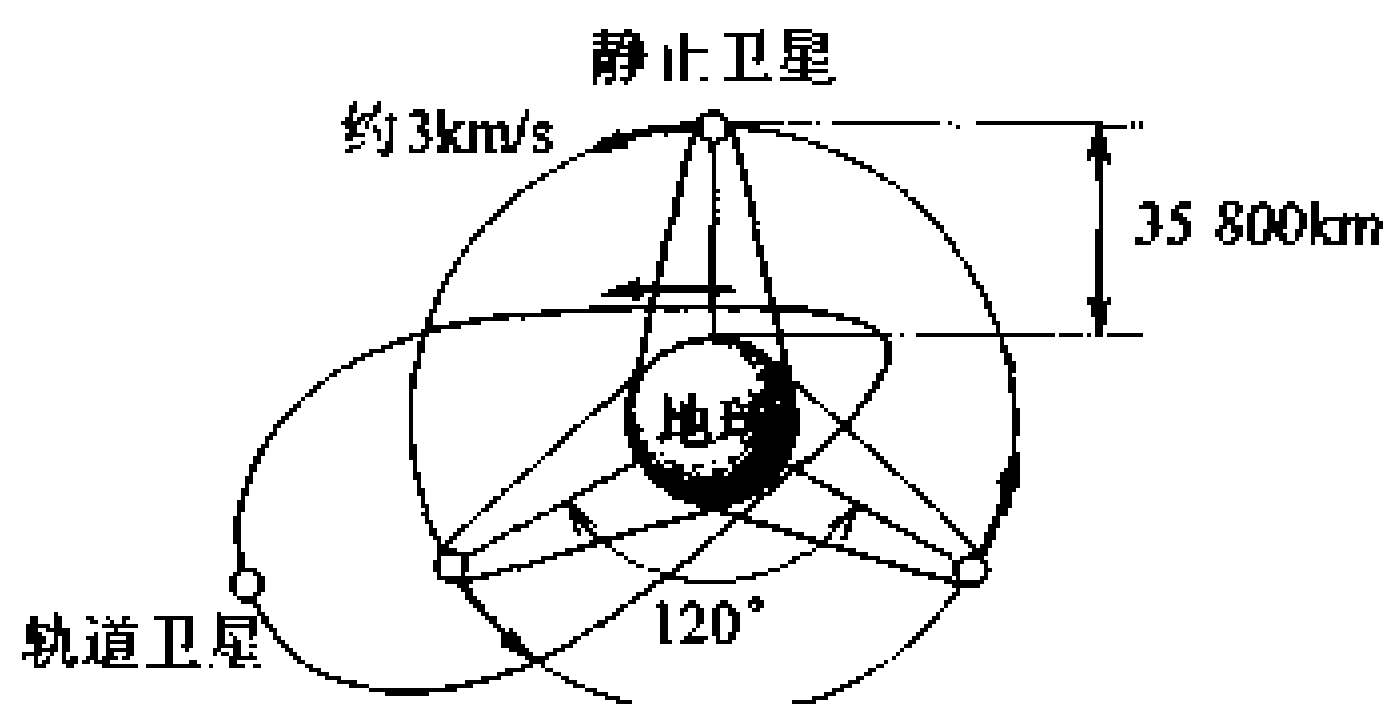


图 8.44 静止卫星和轨道卫星

### ● 脉冲转发器(卫星中继器)

脉冲转发器由接收机、频率变换器和功率放大器构成,如图 8.45 所示。由于卫星上的电源是太阳能电池,所以不可能发射像地面站那样大的功率,为此,需要与天线配合来获得所要求的增益。

### ● 上行线路与下行线路

上行线路  
下行线路

从地面站向空间站发送电波称为上行线路,从空间站向地面站发送电波称为下行线路。

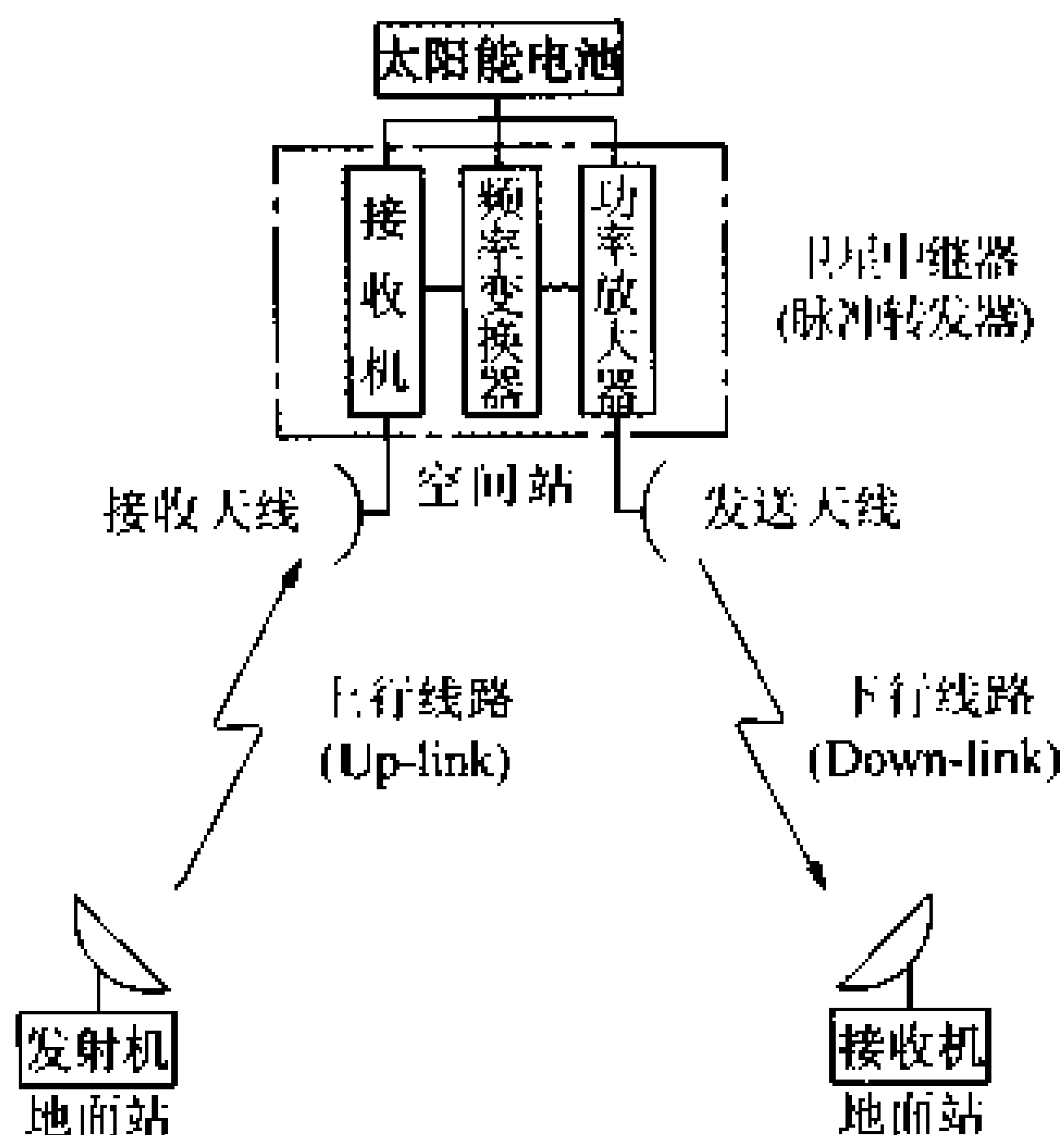


图 8. 45 通信卫星的构成

### ● 电波窗

所谓电波窗,就是频段 1GHz~10GHz。如图 8. 46 所示,这一频段不易受地面站到空间站之间的电离层和降雨降雪的影响,并且宇宙噪声也小,是适合于卫星通信的频段。

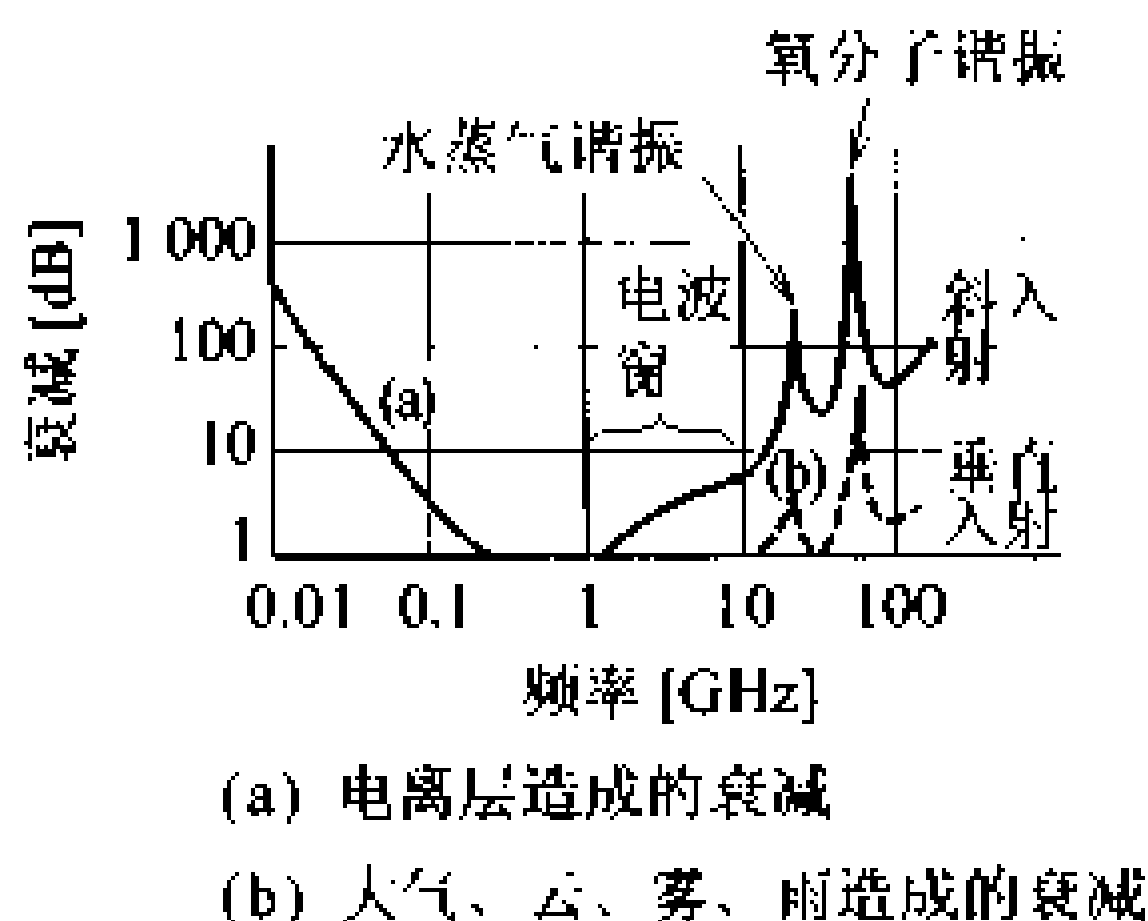


图 8. 46 电波窗

(选自平林、矶上、山本著《标准电  
子技术》,欧姆社出版,1994 年,p. 192)

## □ 相关知识 ● 多址联接方式

时分多址联接  
频分多址联接

是指多个地面站通过通信卫星进行通信的方式,有时分多址联接(TDMA)方式和频分多址联接(FDMA)方式等。图 8. 47(a)的分时使用同一频率进行通信的方式是 TDMA,图 8. 47(b)的按

频率分开进行通信的方式是 FDMA。

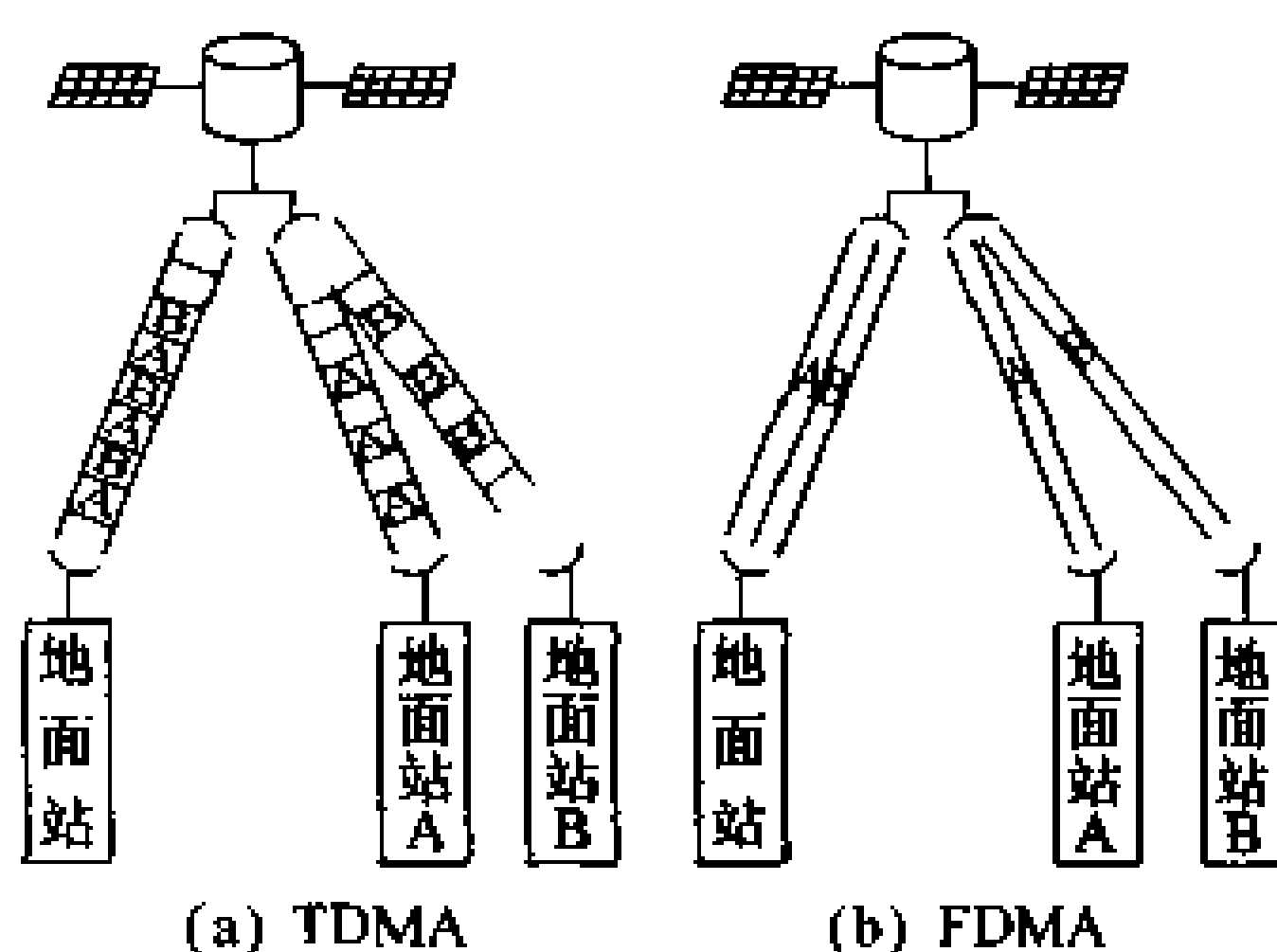


图 8.47 多址联接方式

### ● 各种卫星通信系统

#### INTELSAT

① INTELSAT 意思是国际商用通信卫星机构,是利用通信卫星向全世界提供电话线路和电视传输等通信服务的卫星通信系统。

#### INMARSAT

② INMARSAT 意思是国际海事卫星机构,是利用通信卫星对船舶和飞机等移动体提供电话线路、电报线路、高速数据线路的卫星通信系统。

#### VSAT

③ VSAT 是采用直径约 2 米的小型抛物面天线,经由空间站(卫星)进行各种通信的系统。它由监控线路的 VSAT 地面控制站和使用线路的 VSAT 地面站组成。

此外,还有许多其他利用卫星来进行各种通信业务的系统,例如用于勘察地球资源的 LANDSAT 测地卫星和“向日葵”气象卫星等。

### ● 卫星蚀

春分和秋分前后,太阳、地球、人造卫星位于一条直线上,太阳光被地球遮挡,人造卫星的太阳能电池板上没有阳光照射,称之为卫星蚀,这段时间里无法进行通信。



## 13 数据通信

### □ 要 点

用无线通信线路或有线通信线路(数字、模拟)将具有某种含义的符号传给对方就是数据通信,可以认为它是数据传输与计算机数字处理功能相结合的产物。CCITT(国际电信电话咨询委员会)把数据传输定义为“用机器处理或传送被处理的信息”。

终端设备在模拟线路中由调制解调器联接,在数字线路中由DSU联接。设备间的通信必须有预先制定好的通信规程,称之为协议,其国际标准称之为OSI参考模型。

### □ 解 释 ● 模拟线路与数字线路

通信线路按所传输的信号是模拟信号或是数字信号分为模拟线路和数字线路,如图8.48所示。

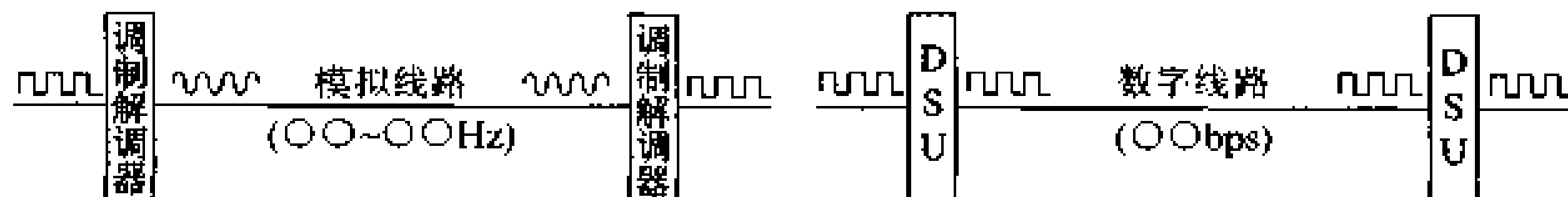


图 8.48 线路的种类

### ● 传输码

JIS中规定,数据通信中的字符和符号的传送采用由7~8位(比特)表示一个文字的信息交换码。测量信息的传送采用由4比特表示一个字符的BCD码。

### ● 数据传输方式

数据传输方式有两种,如图8.49所示。每比特信息都分配一条传输线,一次送出多比特信息的方式称为并行传输方式;按顺序一比特一比特地传送多比特信息的方式称为串行传输方式。

并行传输方式  
串行传输方式

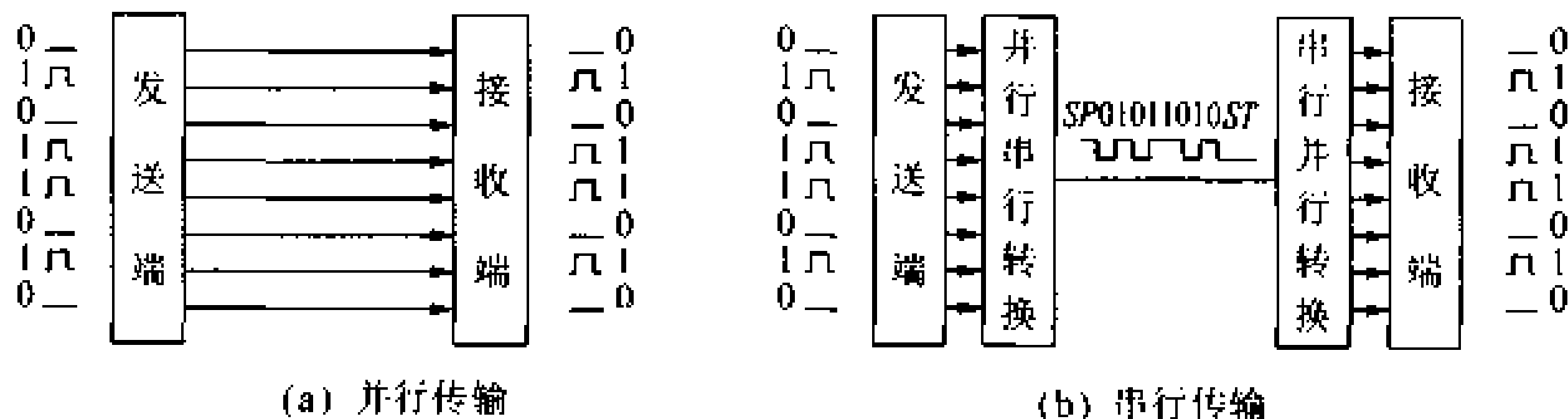


图 8.49 数据传输方式

调制解调器

● 调制解调器

调制器与解调器合在一起就是调制解调器。调制器是为了用模拟通信线路传送数字信号而采用的一种装置,由它对载波进行频率调制或相位调制后,作为模拟信号加以传送。解调器是从已调信号中取出 0、1 数字信号的装置。图 8.50 示出调制解调器的构成。

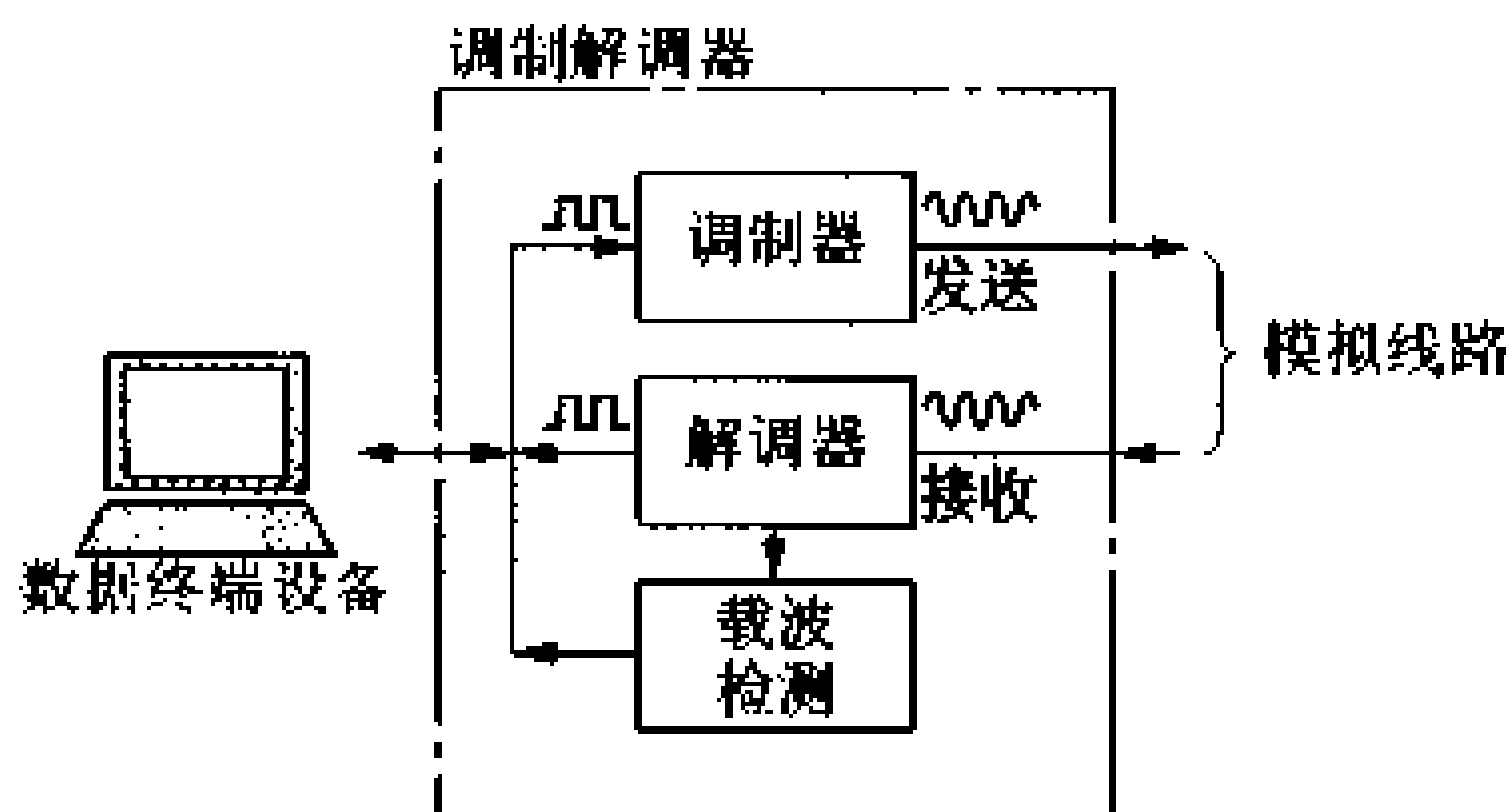


图 8.50 调制解调器构成

● DSU

DSU(数字服务单元)

数字电路中,代替调制解调器的是 DSU(数字服务单元),DSU 把用于同步的帧位和表示控制信息的状态位插到发送数据中予以传送。接收数据的时候再从传输数据中把帧位和状态位分离出来,并且恢复出接收数据。

● 通信协议

通信协议

通信协议是针对计算机或终端设备之间的数据交换方法而制定的约束通信步骤顺序的规程,包括传送速度、同步方式、传输码、数据传输程序段格式等。ISO(国际标准化组织)规定了一个称为 OSI(开放式系统间相互连接)参考模型的 7 层结构协议来推进标准化,其模型如图 8.51 所示。

应用层
表示层
会话层
传输层
网络层
数据链路层
物理层

图 8.51 OSI 参考模型

OSI(开放式系统间相互连接)

□ 相关知识 ● 调制方式

调制解调器通过对载波进行调制,把数字值变成模拟波形来传送。调制方式有振幅调制、频率调制、相位调制等,其波形示于图 8.52。

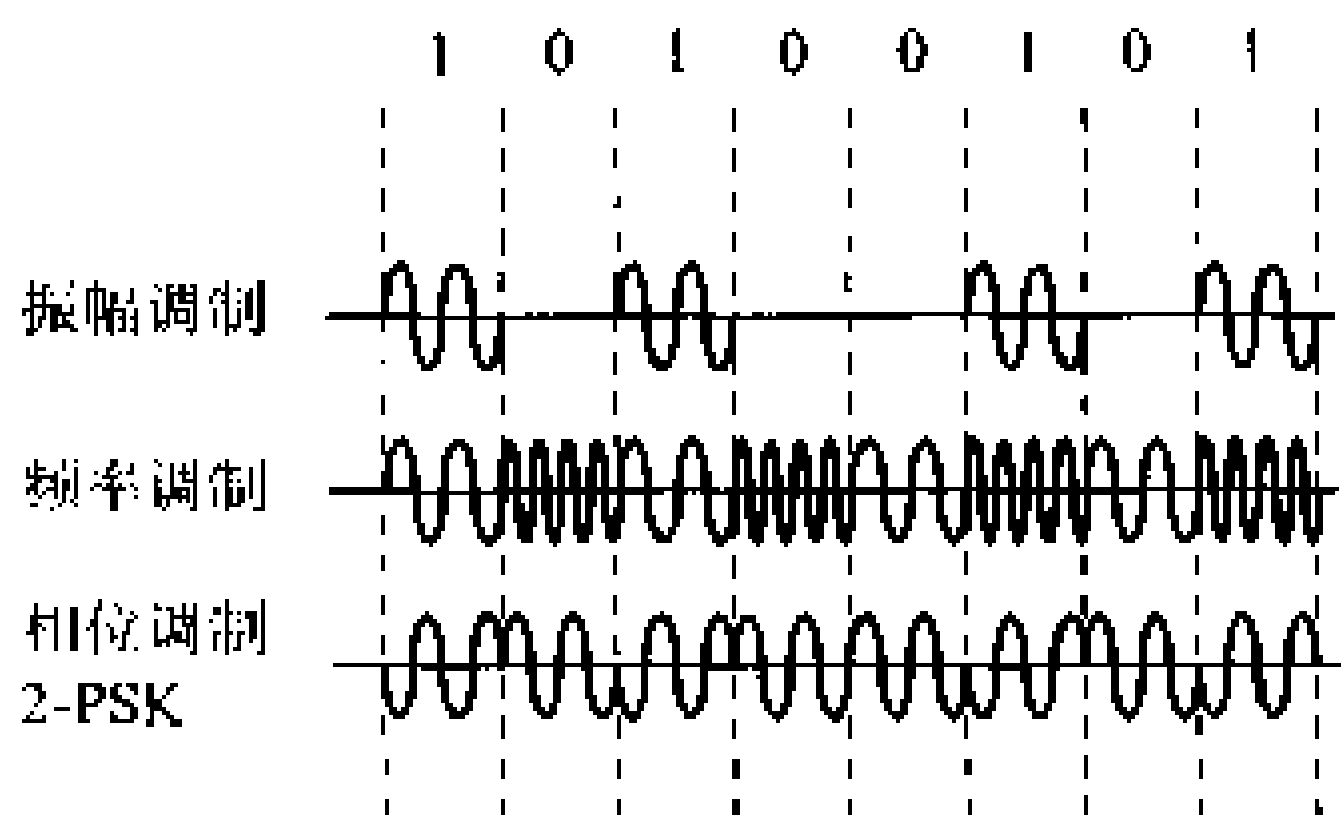


图 8.52 各种调制方式的波形

● 传输速度

数据信号速度  
调制速度  
数据传输速度

传输速度是表征数据传送快慢的量。可分为表征每秒钟所能传送的比特数的**数据信号速度**(单位: bps)、表征每秒钟所能调制的比特数的**调制速度**(单位: baud)、表征每秒钟所能传送的字节数、字符数、数据段数的**数据传输速度**等。

● 同步方式

同步

传送数据的过程中,使接收端信号的开始时刻和结束时刻与发送端保持一致,称之为**同步**。同步所采用的方式称为同步方式,按照所同步的单位,其方式有位同步、每个字符的字符同步、帧同步等。同步的方法有采用同步专用信号线进行的定时同步方式和从数据信号线上提取同步时钟的方式。图 8.53 给出的例子是**起停同步方式**,信息位的前后各加一个称为开始位(ST)和结束位(SP)的同步位,以此来保证信息的正确传输。

起停同步方式

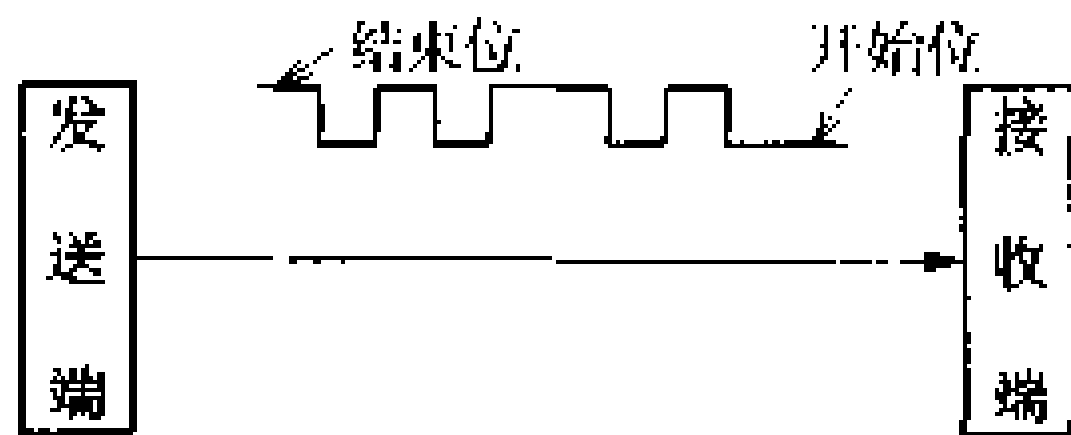


图 8.53 起停同步方式

# 14 数字信号的传输

□ 要 点

数字信号的传输有两种方式，一种是把数字信号转换成交流的振幅、频率或相位来传送的交流传输方式，另一种是直接传送的直流传输方式。分组信息包通信方式是一种高效传输数字信号的方法。把数字信号打成信息包传送出去，接收端再采用组装的办法使原信号复原，能够使通信线路得到有效利用。有线通信领域中，配备着一种叫做 DDX 的数字数据交换网，采用称为分组信息包交换的方式来提高线路网的有效利用率。

□ 解 释 ● 直流传输

基带传输方式

如图 8.54 所示，这是一种用相应的 0、1 符号波形来传送数字信号的方式，也称为基带传输方式。基带传输方式有单流、双流、NRZ(不归零)、RZ(归零)等形式。

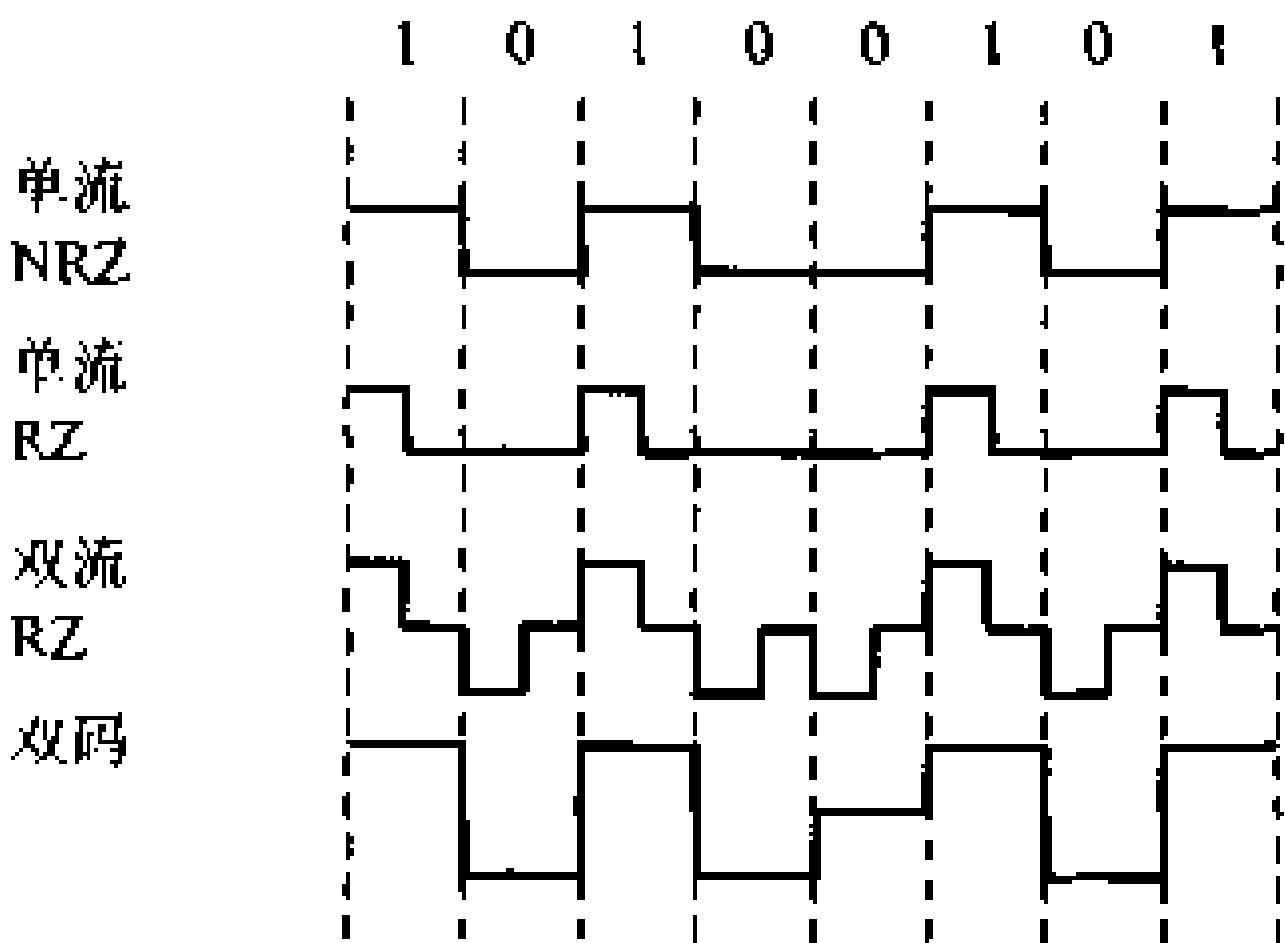


图 8.54 直流传输的码形式

● 分组数据包通信

信息的包

将数字信号包装成具有一定量信息的包，每个包上都带有发信人、收信人地址、编号、信息、错误检查码等，如图 8.55 所示。接收端收到这种信息包后，将其重新组合，恢复成原信号。

发信人	收信地址	编号	信息	检错码
-----	------	----	----	-----

图 8.55 信息包的构成

● DDX

数字数据交换网

数字数据交换网 (Digital Data eXchange) 如图 8.56 所示, 有线路交换和分组信息包交换两种方式。

线路交换(DDX-C)

线路交换(DDX-C)与电话一样, 每次通信都要在终端之间设定通信线路, 整个通信过程中, 线路始终被连续占用着。而数据通信中多为断续的数据, 所以对整个通信网来说, 这种方式的效率是非常低的。

分组交换

分组交换不需要连续占用线路, 加上可以选择适当的路径来传送, 因而通信网的利用效率很高。这种方式又可分为直接与分组交换网联接的 DDX P 方式和到分组交换局之前仍使用电话线路的 DDX TP 方式。国际通信所用的是称为 VENUS P 的通信网。

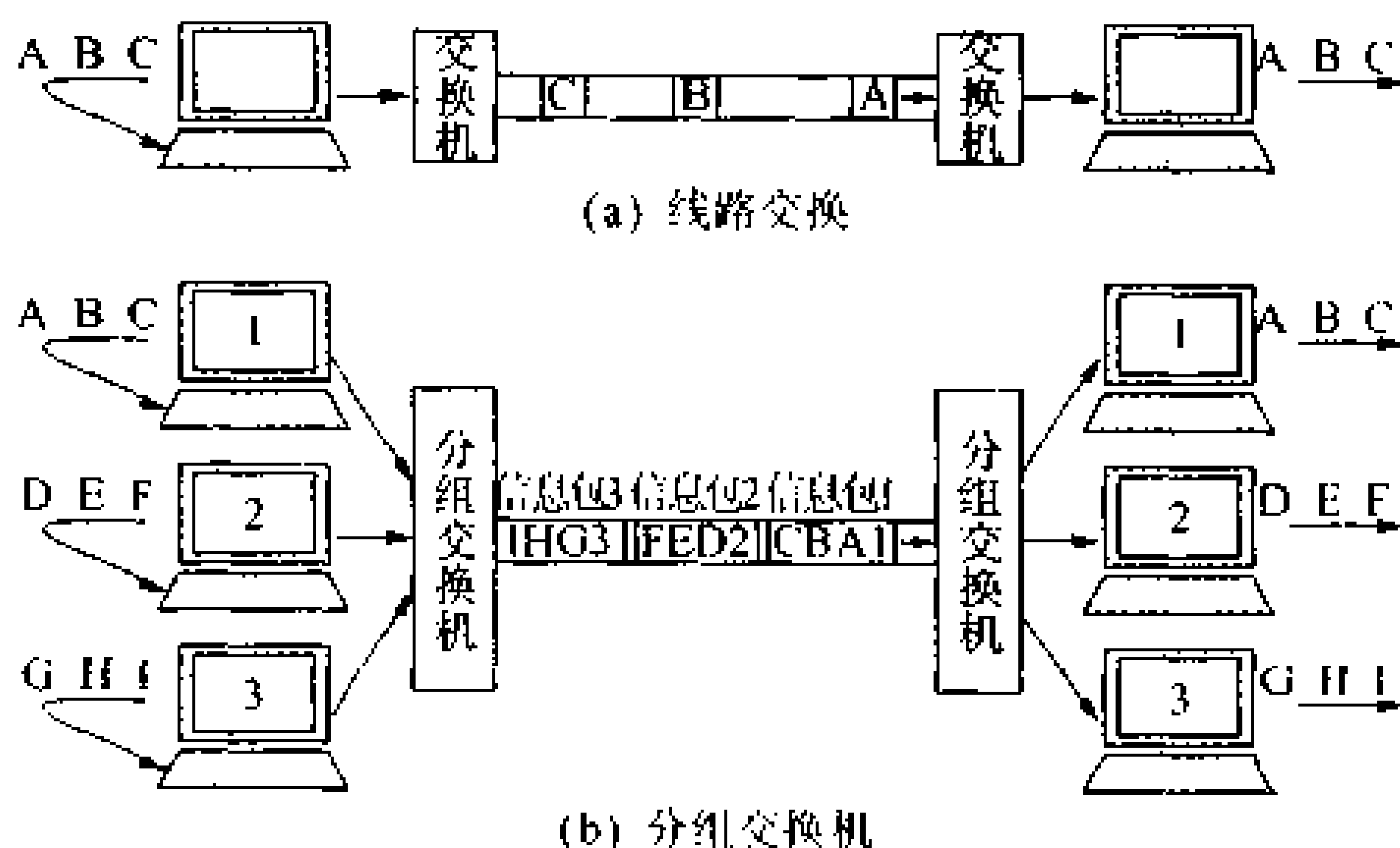


图 8.56 线路交换和分组交换

□ 相关知识 ● ISDN

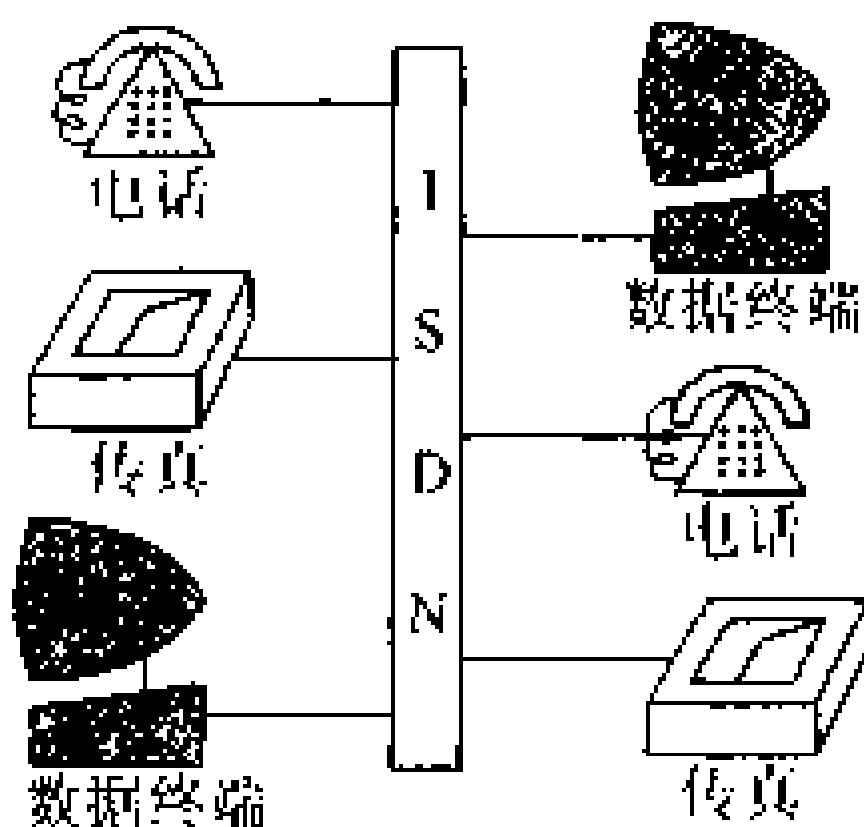


图 8.57 ISDN

ISDN 是 integrated services digital network 的缩写, 意思是综合业务数字网。如图 8.57 所示, 这是一种把电话、传真、数据终端等传输线路全部数字化, 用一个通信网进行综合操作的通信网。

● 传输质量

传输质量是指发送数据能被正确接收到的程度。作为衡量尺度, 常用传输线路的误码率来表示。误码率的计算公式为

误码率

度, 常用传输线路的误码率来表示。误码率的计算公式为

$$\text{误码率} = \frac{\text{接收端产生错误的比特数}}{\text{发送的比特数}}$$

● 传输控制和控制程序

传输控制

传输控制是正确传送数字信号所需的功能,它包括控制程序和差错控制。控制程序有适合于代码信息传输的基本程序和适合于位信息传输的 HDLC 程序。

基本程序

基本程序中采用预先定义好的 10 种传输控制字符在发送端与接收端进行对话,将字符信息(CIS 信息交换码)作为信息块来传送。

HDLC 程序

HDLC 程序中把称为帧的一排位序列作为传输单位来对待,帧是由开始/结束标志、地址段、控制段、信息段及帧校验顺序构成的,能够更准确地传送位信息。

● 差错控制

传输线路中,位差错是难免的,差错控制就是通过检出数据发送和接收内容中的错误来修正差错。

差错检出方式

奇偶校验方式是典型的差错检出方式。如图 8.58 所示,预先把一组数据传输单位中的 1 的位数确定为奇数(odd)或偶数(even),用一个称为奇偶校验位的调整位把传送位的总数调整到奇数或偶数发送出去。接收端根据位数的奇偶是否与规定相符来判断数据的好坏。

此外还有将同一数据连续传送两次,根据结果是否一致来判断传输数据好坏的对照方式。

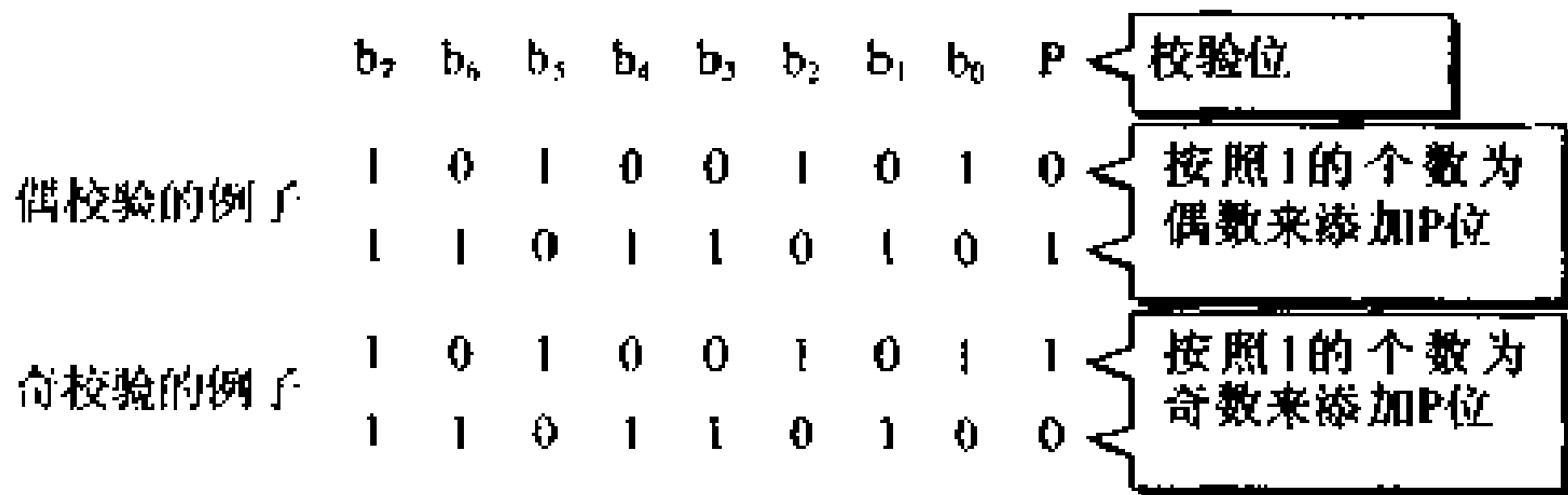


图 8.58 奇偶校验

### (1) 工程承担者资格

具有工程承担者资格证书的人允许从事在电信线路设备上安装终端设备或自营电信设备的工程,以及担任工程监督工作。资格证书的种类分为模拟 1、2、3、数字 1、2、及模拟数字综合三大类。资格考试合格者、培训班课程结业者、邮政大臣认可者等,准予发给工程承担者资格证书。

### (2) 扩频通信

是一种把待传信号调制为频带比信号频谱更宽的已调信号的数字调制方式,故称为扩频。该方式开发源于军事目的的需要,现在多用于雷达和无线电导航等方面。其特点为:

- ① 抗干扰能力强;
- ② 具有保密性;
- ③ 可多路复用;
- ④ 频率利用效率高。

### (3) 毫米波通信

毫米波是指 EHF 波段(30~300GHz),而 10~30GHz 称为亚毫米波段。多用于近距离终端中继,以地面固定站为主。雨天、有雾时衰减大,但能用于大容量通信。此外,还可用于射电望远镜等射电天文台设备、各种雷达及卫星通信等。现在,50GHz 以下已经实用化,正在向更高频率拓展。

### (4) 雷 达

是利用电波直线传播和反射性质来测定目标的方位和距离的设备。雷达能产生  $1\sim 0.2\mu\text{s}$  的短时间微波脉冲或毫米波脉冲,将这种电波按每秒 500~3000 次的重复率发射出去,通过接收反射波来求得目标的方位和距离,并将图像显示在 PPI 显示屏(阴极射线管显示装置)上。常用的雷达有航空机载雷达、船用雷达、机场监视雷达等用于导航和气象观测的雷达等。此外还有利用多普勒效应来测量速度的多普勒雷达。

## 第9章

# 声像设备

音乐、语音等由听觉来感受的事物统称为声(Audio)，立体声放大器、CD等都是声频设备；动画、图像、文字等由视觉来感受的事物统称为像(Visual)，电视机、传真机等都是图像设备；声像(AV)一词指声和像二者兼而有之。

欣赏音乐、观看电视是我们日常生活的一部分，是一种娱乐活动。而在某些时候，它又是传递紧急信息的手段，起着重要作用。

彩色电视技术中，传送彩色动画信号要占用很宽的频带，亮度信号和色度信号要用同一频带复用传送，接收端要重现动画，这些都需要高级电子技术。由于数字技术和半导体技术的进步，音乐和图像已经被作为数据来处理，从而实现了高保真度传输和录放，进而又出现了能合成语音、文字、图像的多媒体设备。

- 责任编辑  
矶上辰雄
- 执 笔  
矶上辰雄



# 1 声音的性质与人的听觉

## □ 要 点

人耳所听到的声音是作为空气密度变化而传播的疏密波,携带着一定的能量在空气中传播,这就是声波。

## □ 解 释 ● 声音的性质和传播速度

物体振动时,与该物体接触的空气随之振动而产生声波。声波不能在真空中传播,但空气以外的气体、液体、固体都能传播。

空气中传播的声波如图 9.1 所示,它是作为前进方向上的空气压力变化以纵波(即疏密波)的形式扩展传播的。其传播速度(音速)因气温而异,设气温为  $t[^\circ\text{C}]$ ,声波的传播速度  $v[\text{m/s}]$  可用下式表示:

$$v = 331.5 + 0.6t \quad [\text{m/s}] \quad (9.1)$$

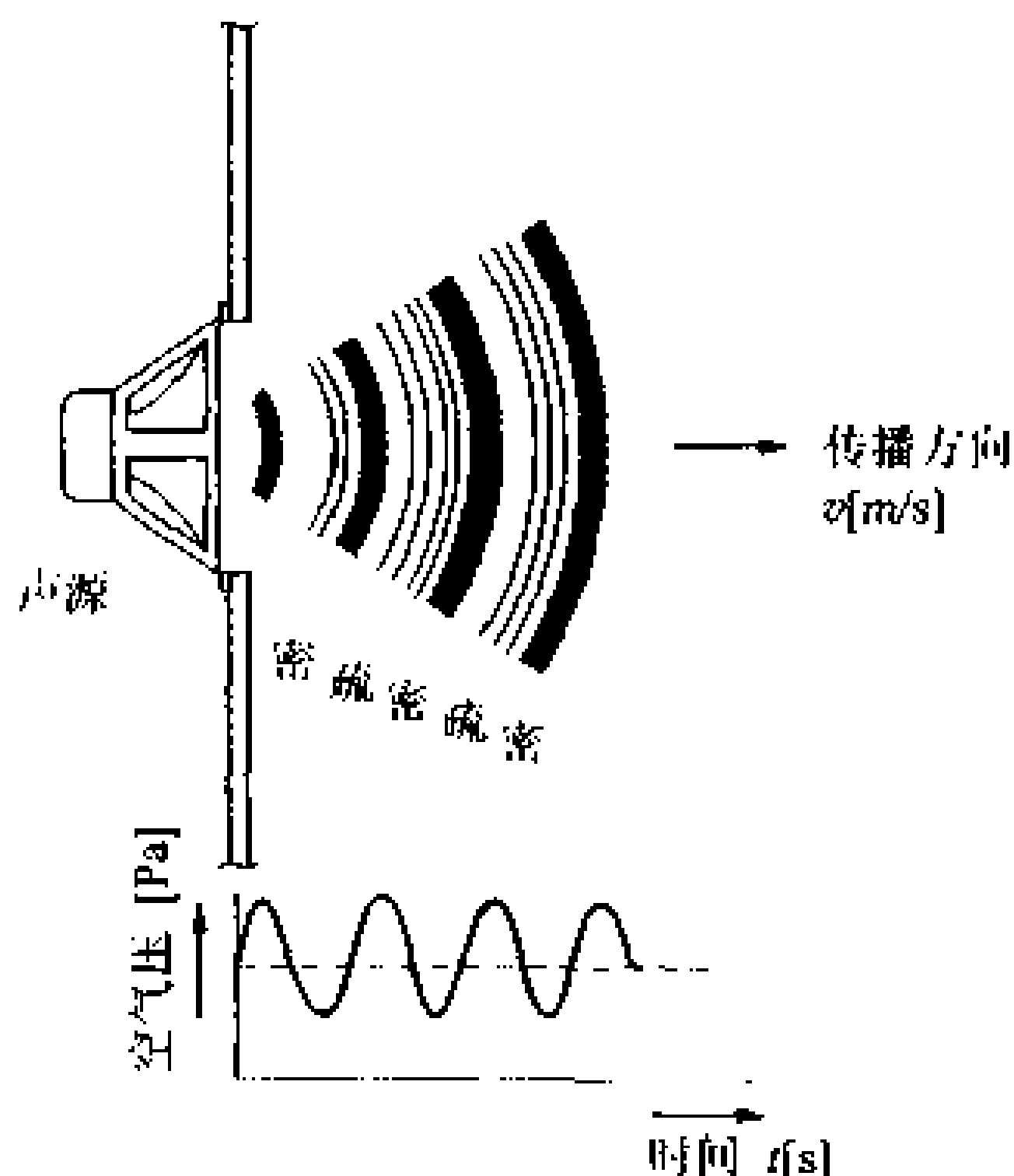


图 9.1 声波的传播方式

声波的频率  $f[\text{Hz}]$  和波长  $\lambda[\text{m}]$  的关系由下式表示:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [\text{m}] \quad (9.2)$$

## ● 声压和声压级

声压

当空气中的压力因声波而变化时,该压力的变化就称为声压。

声压级

声压用其有效值  $P$  表示,  $P$  的单位采用压力的单位 Pa(帕斯卡)。  
由(9.3)式表示的声压值称为声压级, 单位采用 dB(分贝)。

$$SPL=20\lg\left(\frac{P}{P_0}\right)=20\lg\left(\frac{P}{20\times10^{-6}}\right) \text{ [dB]} \tag{9.3}$$

$P_0$  为  $20\mu\text{Pa}$ , 这个值是听觉正常的人能作为声音所感受到的最小声压, 大致与 1000Hz 正弦波声音的最小可听值相对应。

● 人的听觉

人能听到声音频率范围因声压大小和个人因素而有所差别, 大体在 20Hz~20kHz 之间。人能作为声音感受到的声压级最小值称为最小可听值, 其最大值称为最大可听值。声压级低于最小可听值时, 人不能作为声音而感觉到, 而超过最大可听值时, 则会感到疼痛。图 9.2 是以频率为变量, 用单频音声压级表示的人耳平均可听范围曲线, 称为等感曲线。

最小可听值

最大可听值

等感曲线

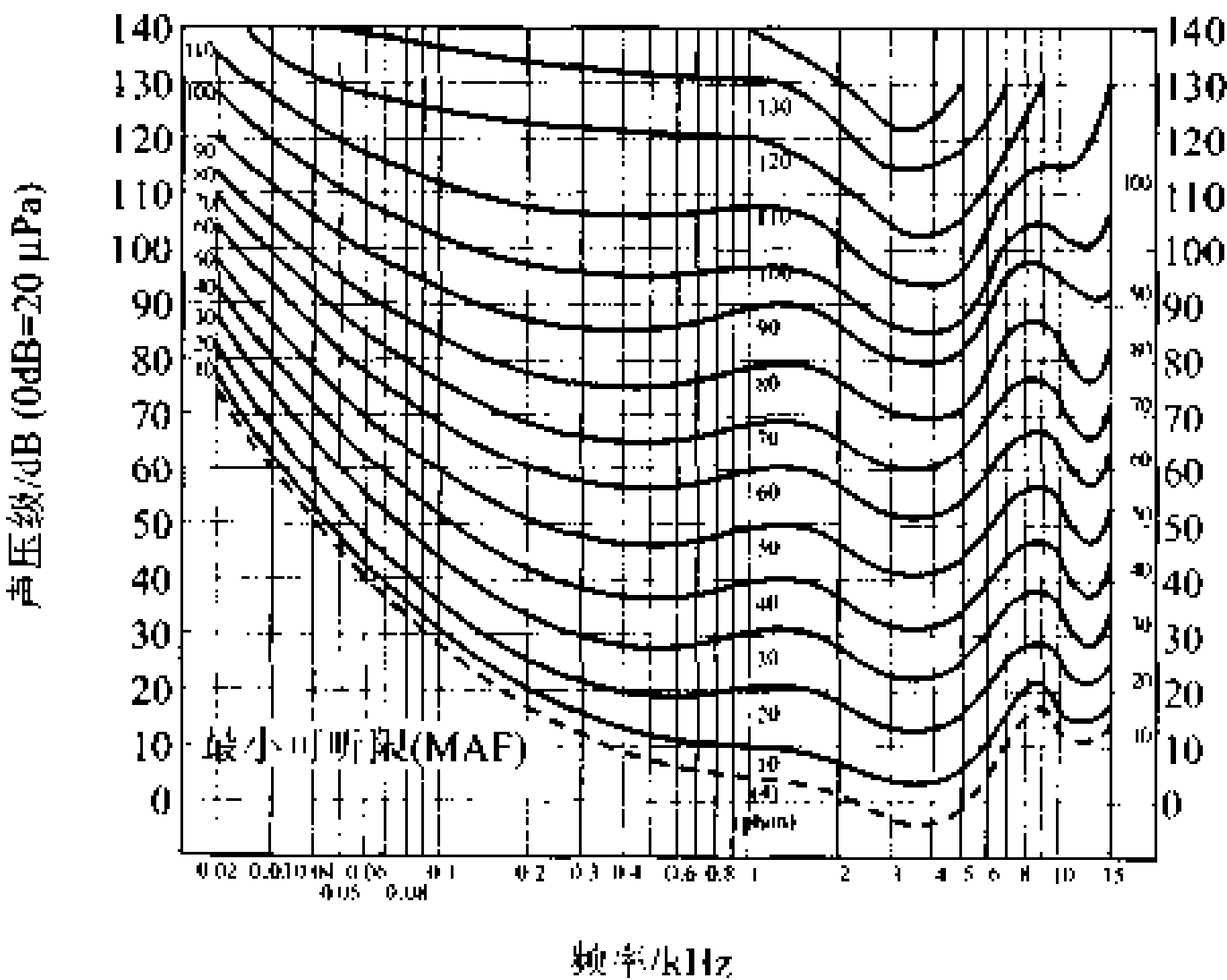


图 9.2 等感曲线

## 2 拾音器和扬声器

**□ 要点** 拾音器是把声音或音乐等声能变换成电信号的设备,扬声器是把电信号变换成声能的设备。

**□ 解释** ● 拾音器

拾音器依其原理和构造有很多种,特性也各不相同。其种类有电容式拾音器、电动式拾音器和应用了压电元件的晶体拾音器等。

### ● 电容式拾音器的构造和原理

如图 9.3 所示,电容式拾音器由随空气振动而振动的可动电极(振动膜)和固定电极构成。当电极间加有直流电压(200V~300V)、可动电极因声压作用而振动时,电极间的电容就发生变化,积蓄在电极之间的电荷随之发生变化。这一变化作为电流流过负载电阻  $R$ ,输出端就得到了与声音大小相应的电信号。

### ● 电容式拾音器的特性

与其它结构的拾音器相比,电容式拾音器有频率特性和音质好、噪声小等特点,因而常用作标准拾音器和广播台使用的设备。

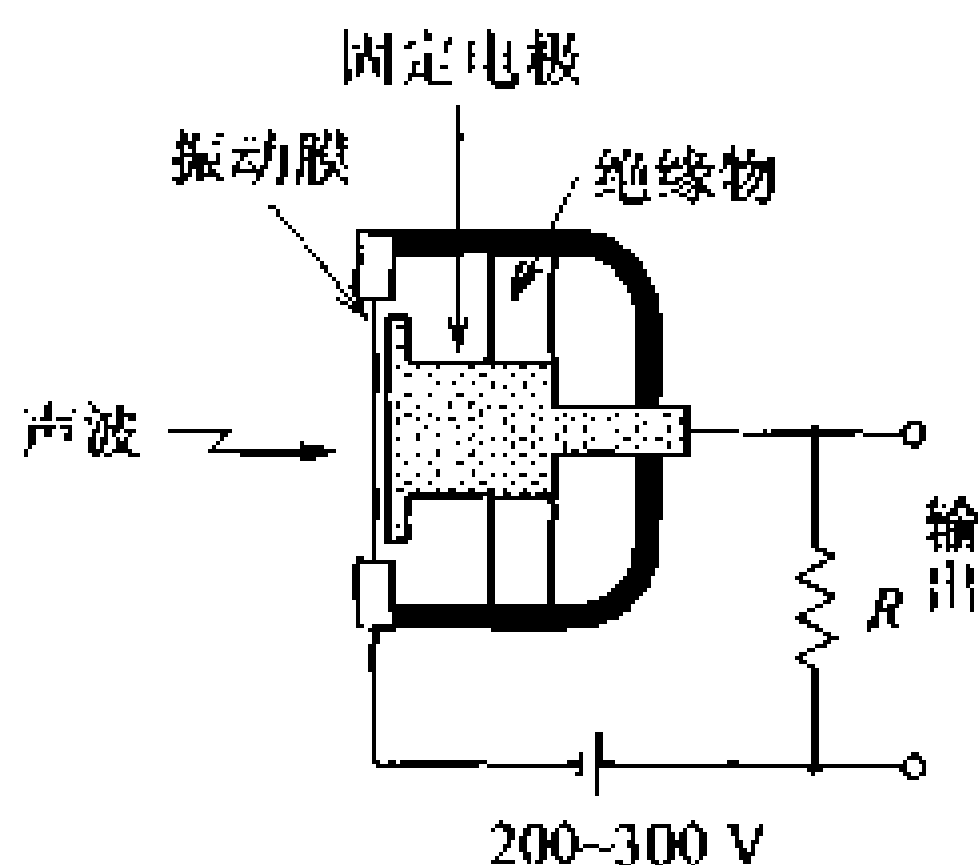


图 9.3 电容式拾音器

### ● 驻极体拾音器

与电容式拾音器的原理基本相同,只是电极之间有一层永久带电的高分子膜(称为驻极体),因而它不需要像电容式拾音器那样加直流高电压。图 9.4 是驻极体拾音器的构造图。

### ● 电动式拾音器的构造和原理

电动式拾音器的构造是在永久磁铁的磁场里置有一个可动线

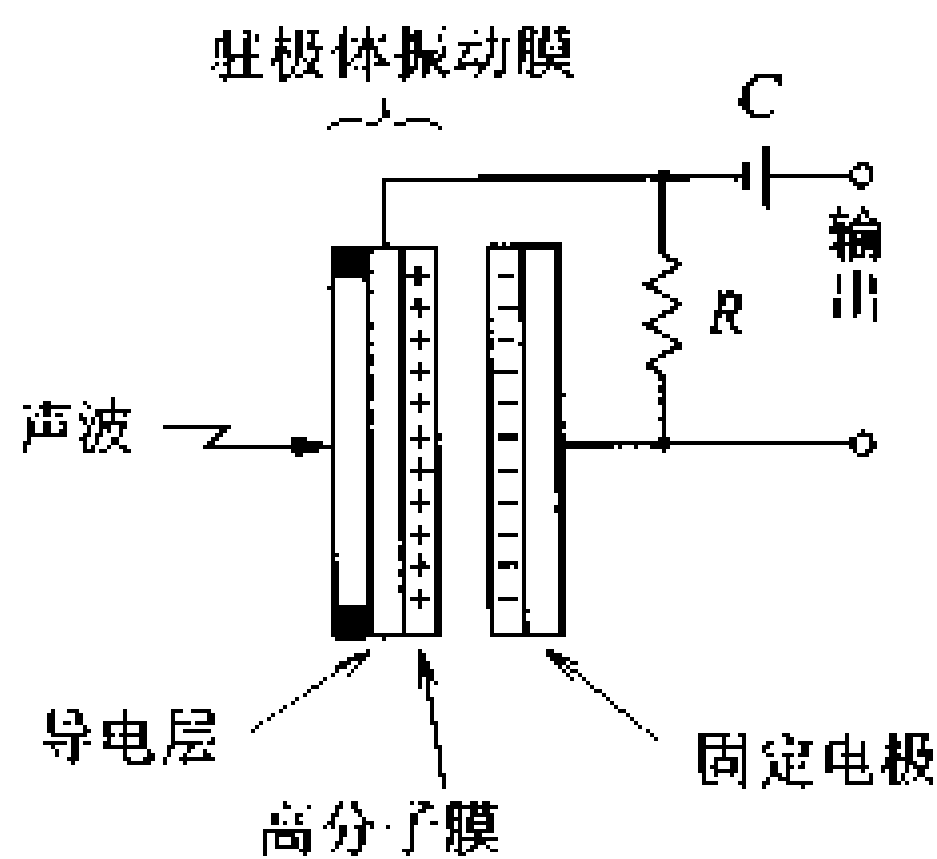


图 9.4 驻极体拾音器

圈(音圈),音圈直接连在由硬铝薄膜等材料做成的振动膜上。当振动膜在声波作用下发生振动时,线圈中因电磁感应而产生电动势,于是声波就变成了电信号。这种拾音器的输出阻抗很低,只有几十  $\Omega$ ,必要时要用变压器变换成  $600\Omega$  或几十  $k\Omega$ 。其特点是频率特性比较平坦、噪声小、受温度和湿度影响小,结构牢靠。

● 扬声器

按其工作原理可分为电动式、电磁式、压电式等各种类型,收音机、电视机、立体声等音响设备中常用频率特性和音质较好的电动式扬声器。

● 电动式扬声器的构造和原理

图 9.5 是电动式扬声器的构造。可动线圈位于强磁场中,当声频电流流过时,线圈受弗莱明左手法则所产生的电磁力作用而前后振动,使振动膜产生向空间传播的声音。为了提高扬声器的发声效率,必须防止空气压力向扬声器内侧蔓延,为此,一般要给扬声器配上机箱。

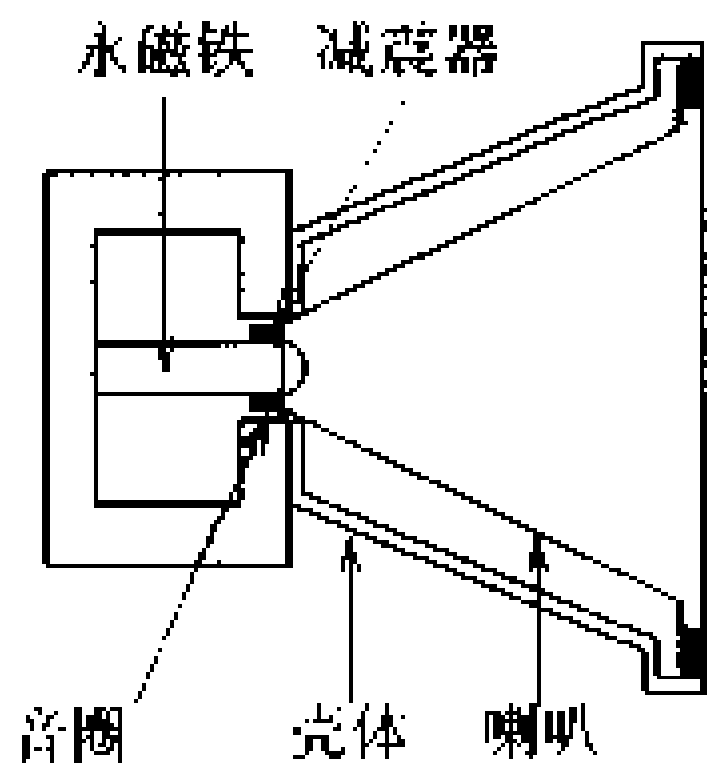


图 9.5 电动扬声器

### 3 摄像管和固体摄像器件

#### □ 要 点

在电视摄像机和视频摄像机中,对镜头所得到的光学图像进行分解,并变换成电信号的装置是摄像管或固体摄像器件。

#### □ 解 释 ● 摄像管

光电导型摄像管  
移像型摄像管

摄像管是利用光电效应或光电导效应把成像在光电面上的景物图像变换成电信号的器件。利用光电导效应制成的摄像管称为光电导型摄像管,根据其光电导材料的不同,它有很多种类,例如硫化锑管、硒砷锑管等。利用光电效应制成的摄像管称为移像型摄像管,超正析像管等就属这一类。此外还有用于夜视的摄像管,管子上带有像增强器,因而灵敏度很高。

如图 9.6(a)所示,光电导型摄像管由对外来光进行光电变换和存贮的光电靶面、发射电子束的电子枪和对电子束进行聚焦偏转的聚焦偏转线圈组所组成。光电靶如图 9.6(b)所示,由玻璃面板、透明导电膜和光电导膜构成,透明导电膜与外部信号电极相连。当光通过镜头碰到光电导膜时,光电导膜的电阻按照光的亮度大小发生变化。光电导面相对于阴极是正电位,当电子束对其进行扫描时就有与靶面上亮暗相对应的电流流过电阻  $R$ ,从而得到图像信号。

#### ● 固体摄像器件

CCD 型摄像器件  
MOS 型摄像器件

与摄像管不同,固体摄像器件不用电子束,而是用配置在靶面上的许多光电二极管作为像素来进行光电变换,并由 CCD(电荷耦合器件;charge coupled device)或 MOS 型晶体管从光电变换后的信号电荷得到电信号,分别称为 CCD 型摄像器件和 MOS 型摄像器件。与摄像管相比,固体摄像器件的图像分解率等画面质量稍差一些,但在体积小、重量轻、使用方便、图像几何失真小等方面具有优势,因而广泛应用于家用摄录机中,广播级摄像机中也已有所应用。

CCD 的构造如图 9.7(a)所示。它是一种固体元件,当把栅极电压依次从  $V_1$  切换到  $V_2$ 、 $V_3$  时,积蓄在栅极  $G_1$  下的电荷就顺次向  $G_2$ 、 $G_3$  转移。CCD 型固体摄像器件中就用了这种 CCD,如图 9.7(b)所示,其结构是一种由光电二极管和 CCD 纵横整齐排列的面阵。当图像的光照在光电二极管面阵上时,一幅画面经光电变换后的信号电荷就积蓄在每条垂直 CCD 线阵上,接着,每条水平

线上的电荷顺次转移到水平 CCD 上,而后,水平 CCD 再顺次将每个像素向输出端转移,于是就得到了图像信号。

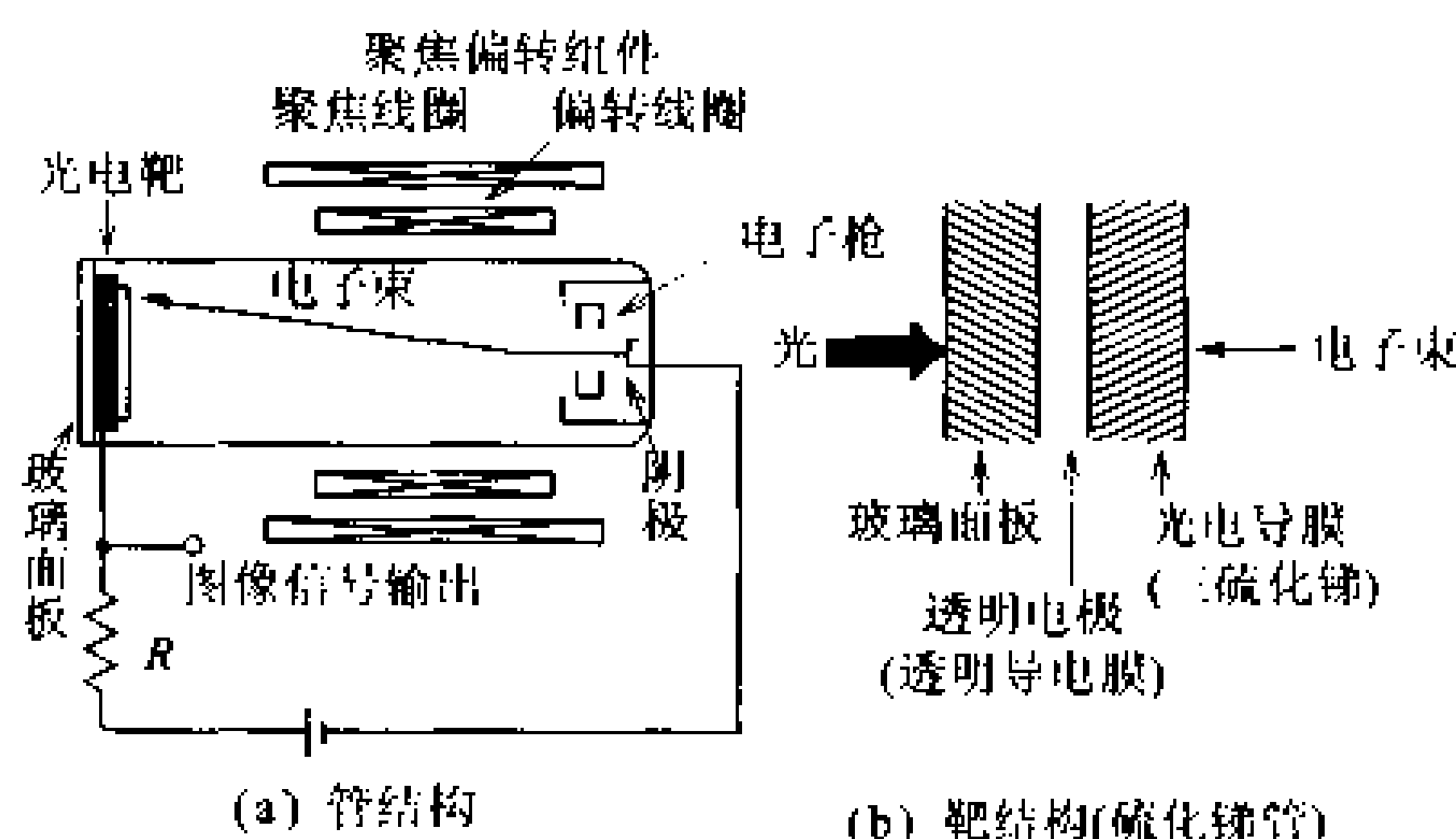


图 9.6 光电导型摄像管

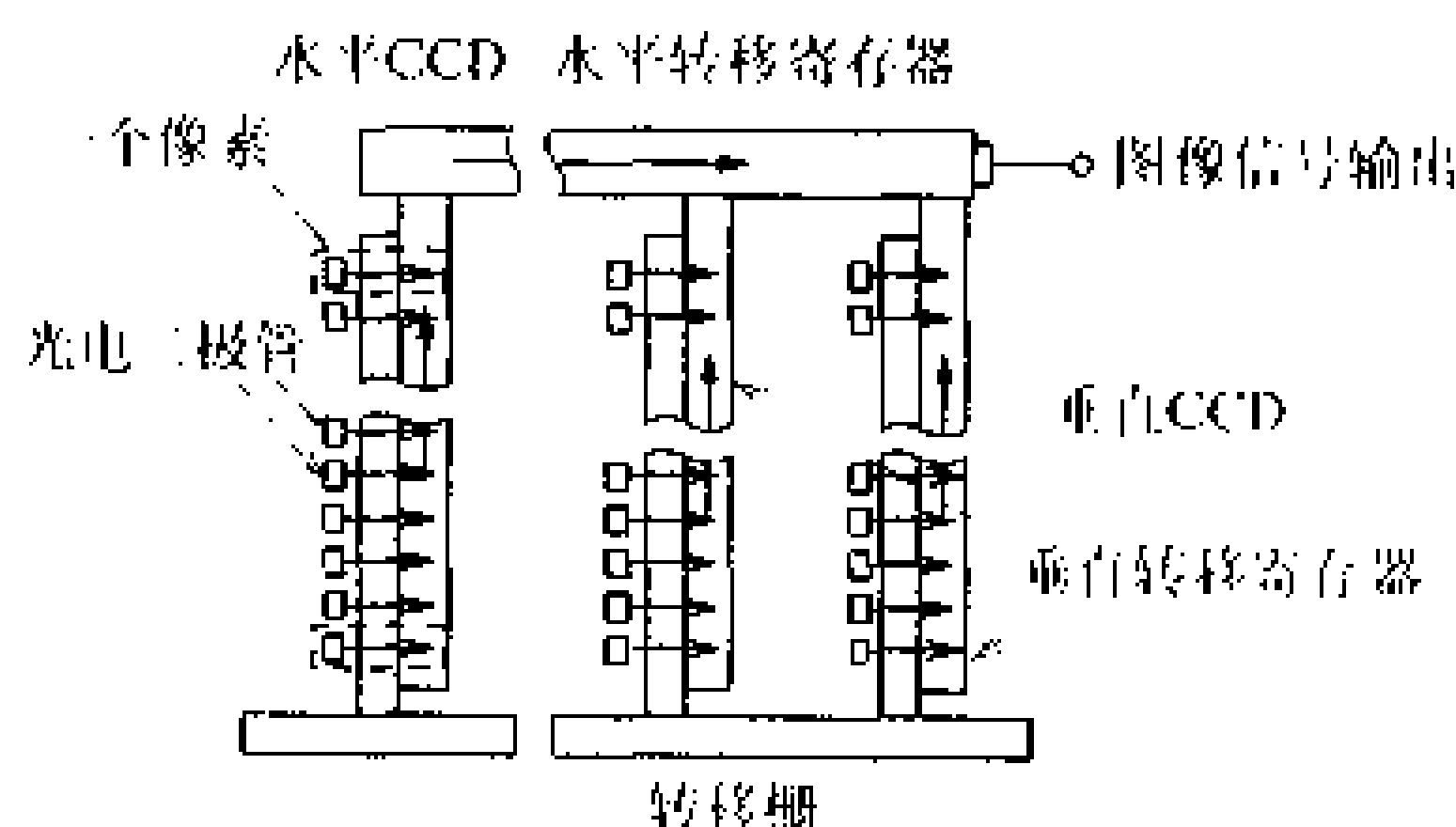
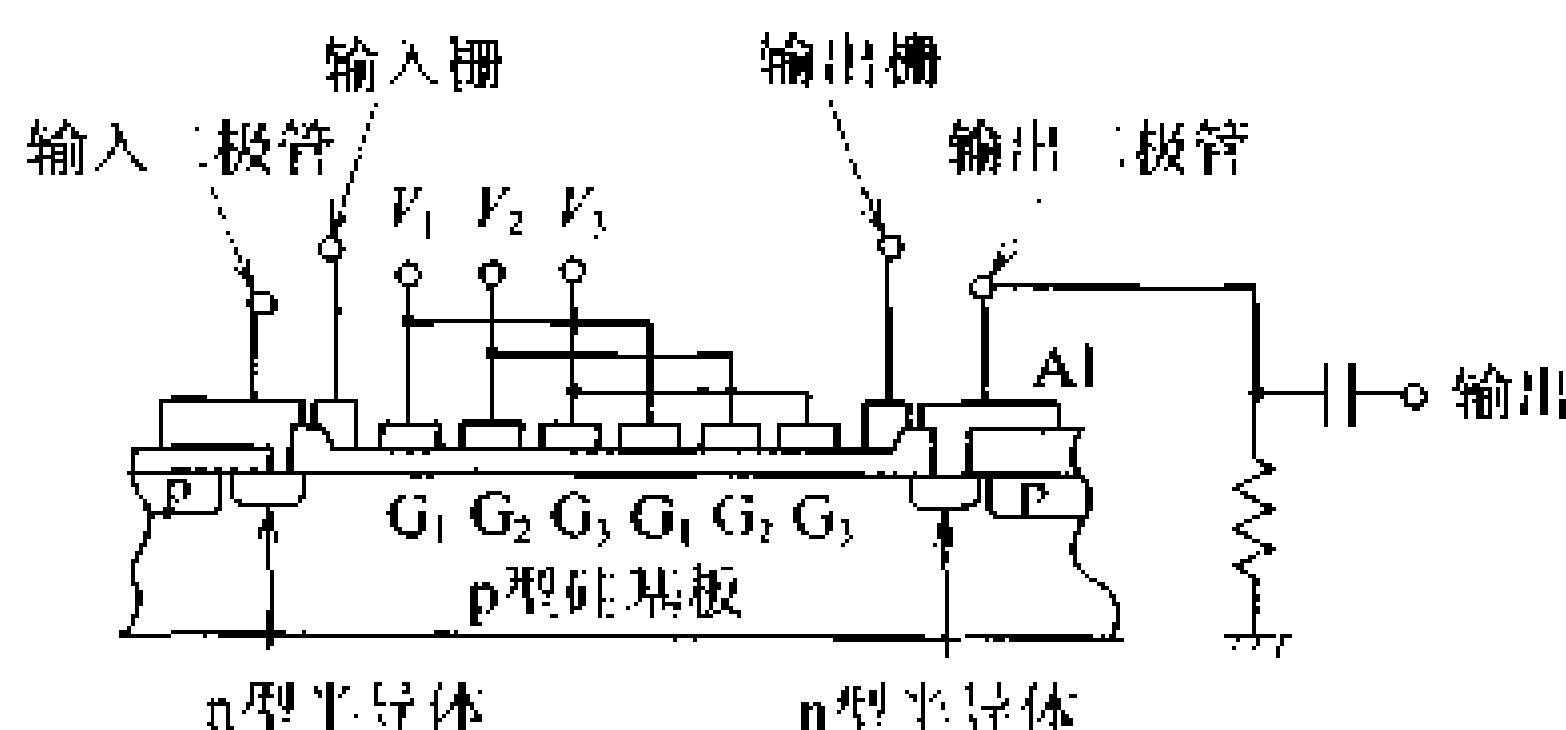


图 9.7 CCD型固体摄像器件

## 4 显像管和液晶显示器

### □ 要点

显像管和液晶显示器是把含有图像信息的电信号转换成图像、文字等形式显示出来的器件,电视机和计算机文字显示是其典型应用。显像管也常称为 CRT(cathode ray tube)。

### □ 解释

#### ● 显像管的构造和工作原理

显像管有黑白显像管和彩色显像管两种。图 9.8 是黑白显像管的构造。

阴极发射出的电子被称为栅极的圆筒形电极聚焦成电子束,这一部分也因该功能而被称为电子枪。电子枪发射出的电子束受偏转线圈磁场作用而上下左右偏转,同时,受阳极上高电压的吸引以高速度撞击荧光屏,使之发光。由于电子束的强弱随电子枪内栅极上所加电压的大小而变化,所以荧光屏上的亮点也有明有暗。

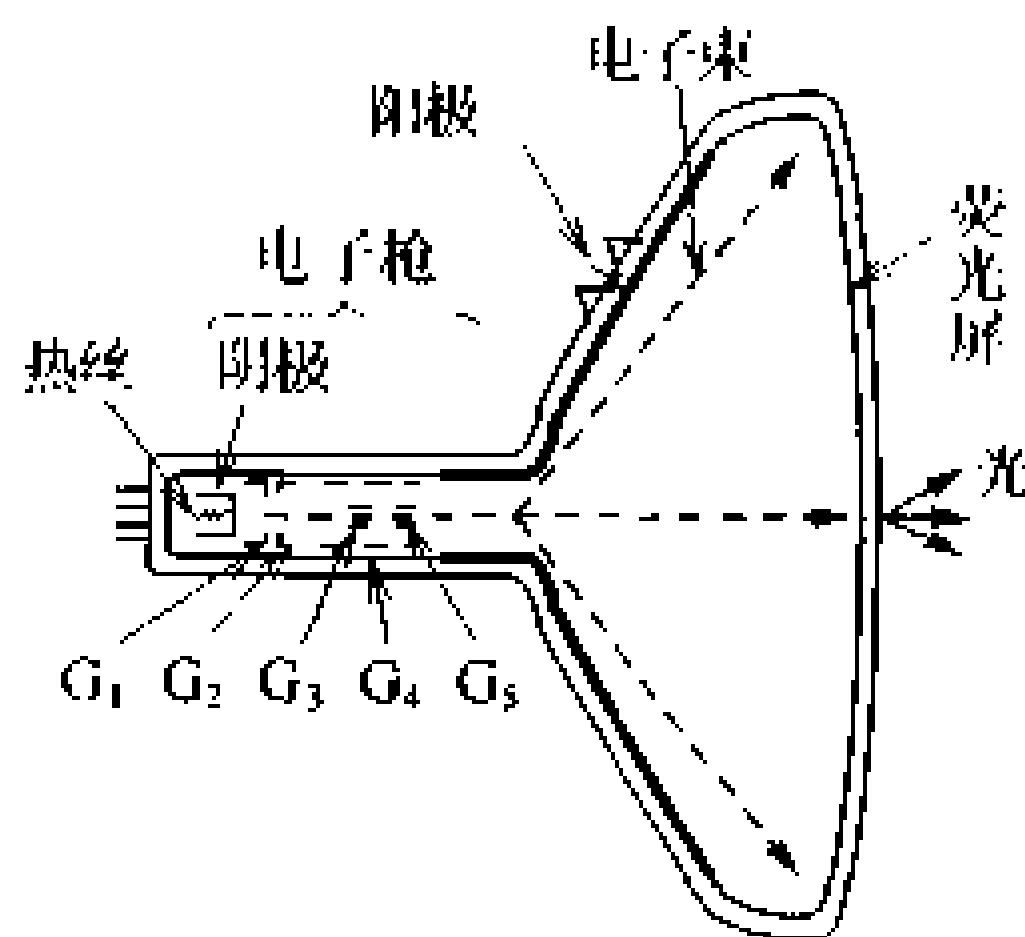


图 9.8 黑白显像管

#### ● 彩色显像管

彩色显像管的工作原理基本上与黑白显像管相同,不同之处在于彩色管有三根电子枪和一个荫罩。如图 9.9 所示,三根电子枪的作用是分别使红、绿、蓝三基色荧光粉小点发光,而荫罩是为了使三束电子束能准确打到各自对应的荧光粉上而安装在荧光屏内侧的一个开了许多小孔的金属薄膜。电子枪发出的三束电子束经偏转后穿过荫罩撞击各自对应的红、绿、蓝荧光粉使之发光,并由红、绿、蓝的搭配得到所有颜色的光。

电子枪和荧光屏的结构如图 9.10 所示,有三枪式和单枪式两种。而枪和荧光粉的配置又有三角形和一字形两种。

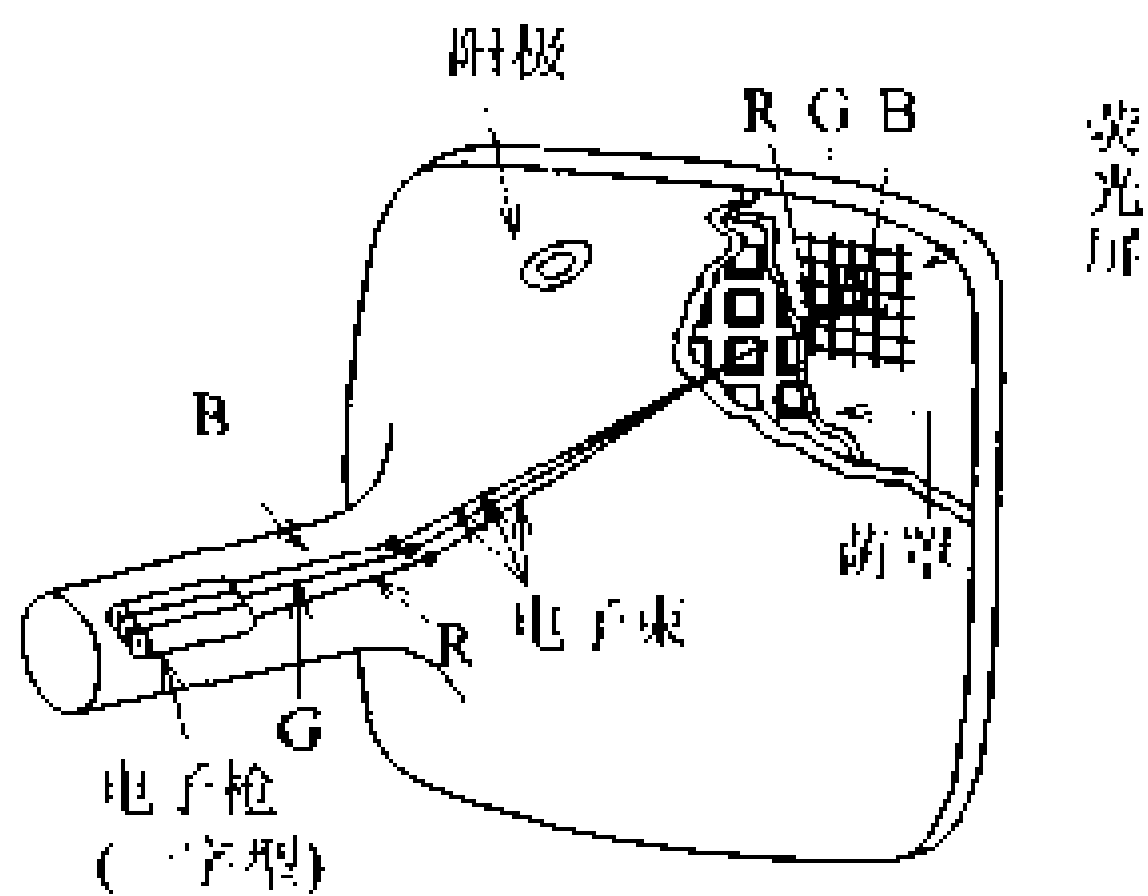


图 9.9 彩色显像管

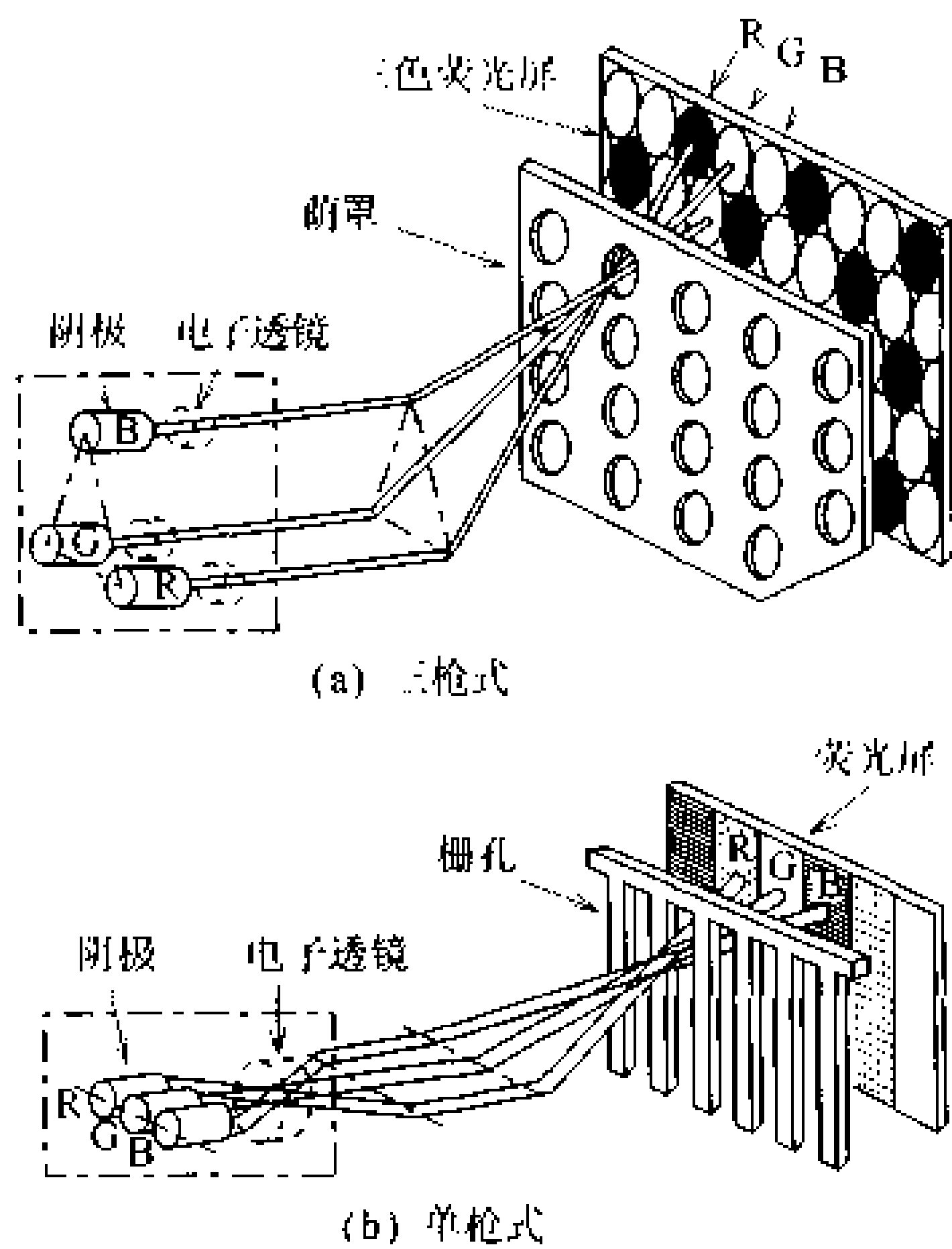


图 9.10 电子枪和荫罩的结构

● 液晶显示器

液晶显示  
TN(扭转向列)  
方式

液晶是液体和固体中间的有机物分子按细棒形状的规则排列。液晶显示(LCD:liquid crystal display)依其液晶的种类和光学效应有各种方式,现在广泛采用的是 TN(扭转向列:twisted nematic)方式。图 9.11 示出其工作原理。在透明电极间未加电压的状态下,分子取向被扭转 $90^{\circ}$ ,进入液晶内的入射光就沿着扭转



方向旋转  $90^\circ$ ，通过液晶后从只让水平偏振光通过的偏振片 B 穿出。当透明电极间加有电压时， $90^\circ$  扭转消失，入射光的偏振面不发生旋转，因而不能穿过偏振片 B。利用这种通过加在液晶上的电压来改变亮度的原理所制成的器件就是液晶显示器。偏振片 A 是为了只让入射光的垂直偏振分量进入液晶而设置的。

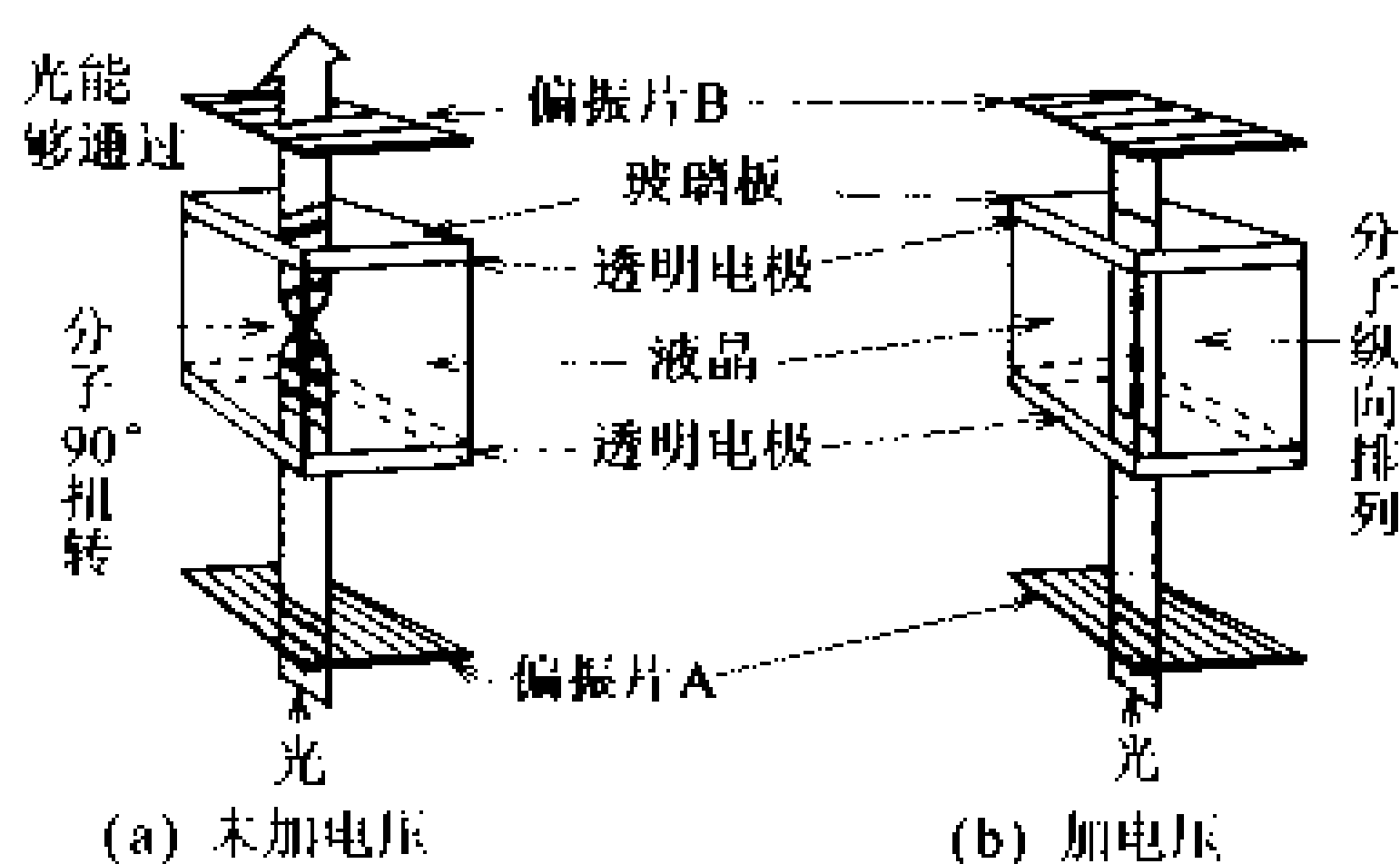


图 9.11 液晶显示的原理

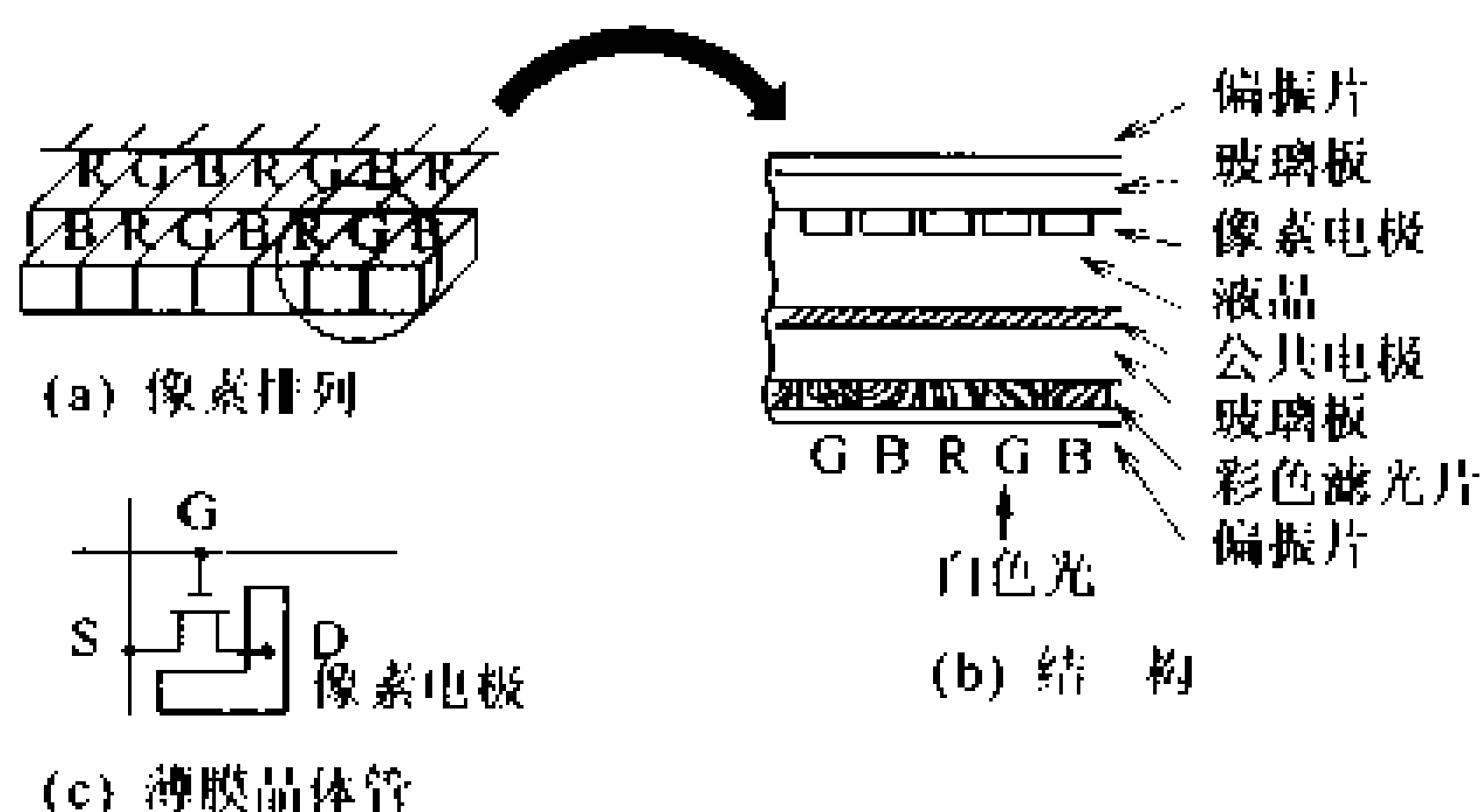


图 9.12 彩色液晶显示器

彩色液晶显示器如图 9.12 所示。每个像素上带一组红、绿、蓝滤光片形成三基色，透明基板上排列着用以控制各像素明暗的晶体管。这种晶体管被称为**薄膜晶体管** (TFT; thin film transistor)，它与液晶板是一体化的。

薄膜晶体管

## 相关知识 ● 磁偏转与电偏转

偏转

磁偏转

迫使电子束在显像管内左右上下摆动，称之为**偏转**。利用线圈磁场对电子束的作用实现偏转的，称为**磁偏转**；利用加在显像管

## 电偏转

偏转电极上的电压的电场作用使电子束偏转的,称为电偏转。

### ● 示波管

示波器上所用的显示管称为示波管。由于频率特性的关系,示波管都采用电偏转。

## 5 无线广播

### □ 要 点

打开收音机,人们就能听到说话或音乐。以直接向公众播放语言或音乐节目为目的而发射电波称之为无线广播。发射电台有中波台、短波台和超短波调频台,节目方面有新闻报道、音乐、戏曲等等。

### □ 解 释

#### ● 无线广播台系统

图 9.13 示出无线广播台的构成。播音员的声音在播音室里由拾音器变换成电信号后传送给副控室,此外,也有根据需要用录音带和 CD 唱盘等作为节目源制作的节目,这些节目都经副控室传送给主控室。主控室将来自各副控室、台外中继及其它广播台的语音节目按节目单加以选取,通过有线线路或无线线路(STL: studio transmitte link)送给发射台。发射台将送来的语音信号经发射机进行调制后,以必要的功率从天线发射出去。发射台几乎都是无人值守的,为了减少因故障而停播的现象,所有发射台都备有热备份发射机。

#### ● 中波广播和短波广播

中波广播的频率范围为  $526.5\text{kHz} \sim 1606.5\text{kHz}$ ,  $1080\text{kHz}$  的总频段,按  $9\text{kHz}$  的间隔共分为 120 个频道。短波广播的频率在日本是按表 9.1 划分的。中、短波广播的发送方式都采用双边带调幅方式(DSB-AM)。发射功率从  $100\text{kW} \sim 500\text{kW}$  的大功率到  $100\text{kW}$  以下的小功率都有所应用,是根据收听地区范围及与相邻国家电台间的干扰等因素决定的。

主控室

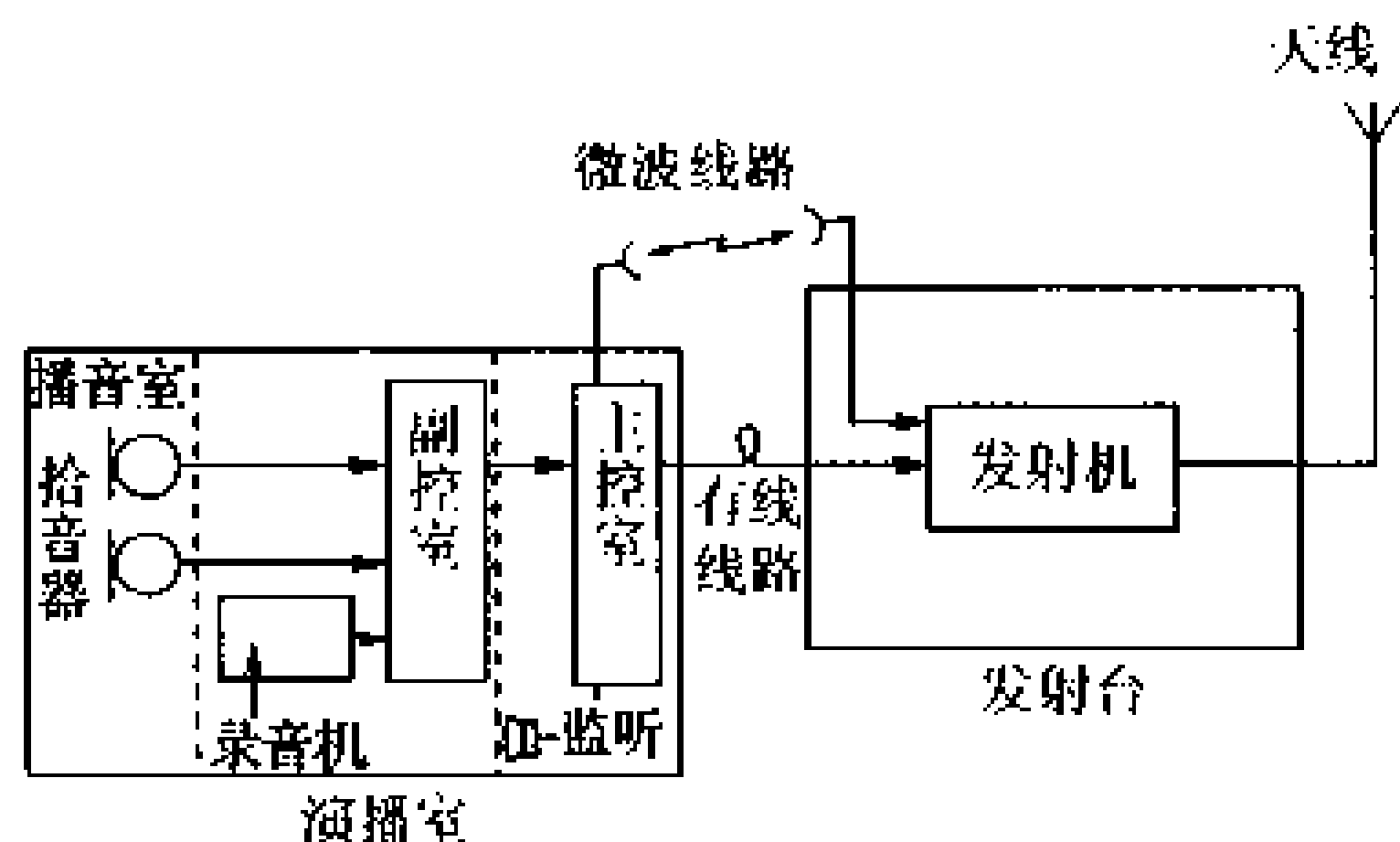


图 9.13 无线广播台的系统

表 9.1 短波广播的频带

频带/MHz	频率/kHz	带宽/kHz	频道数
6	5 950~6 200	250	49
7	7 100~7 300	200	39
9	9 500~9 900	400	79
11	11 650~12 050	400	79
13	13 600~13 800	200	39
15	15 100~15 600	500	99
17	17 550~17 900	350	69
21	21 450~21 850	400	79
25	25 670~26 100	430	85
合计		3 130	617

注：在日本国内进行广播时，使用 3MHz 频带的部分。

● 无线发射机

图 9.14 给出了无线发射机的构成实例。大功率发射机的末级功率放大器采用电子管，而中功率以下的发射机采用大容量 MOS FET 或大容量晶体管元件。

大功率发射机的调制方式采用图 9.15 所示的末级板极调制、帘栅极调制或者末级板极与末前级同时调制的方式。中功率的固体化发射机中采用语音 PWM 调制方式。为了保证频率的稳定度，晶体振荡器要放在恒温槽里，这种措施能使频率误差小于允许值±10Hz。此外，也常采用把已调波的一部分加以整流后负反馈到语音输入端的办法来改善调制特性。

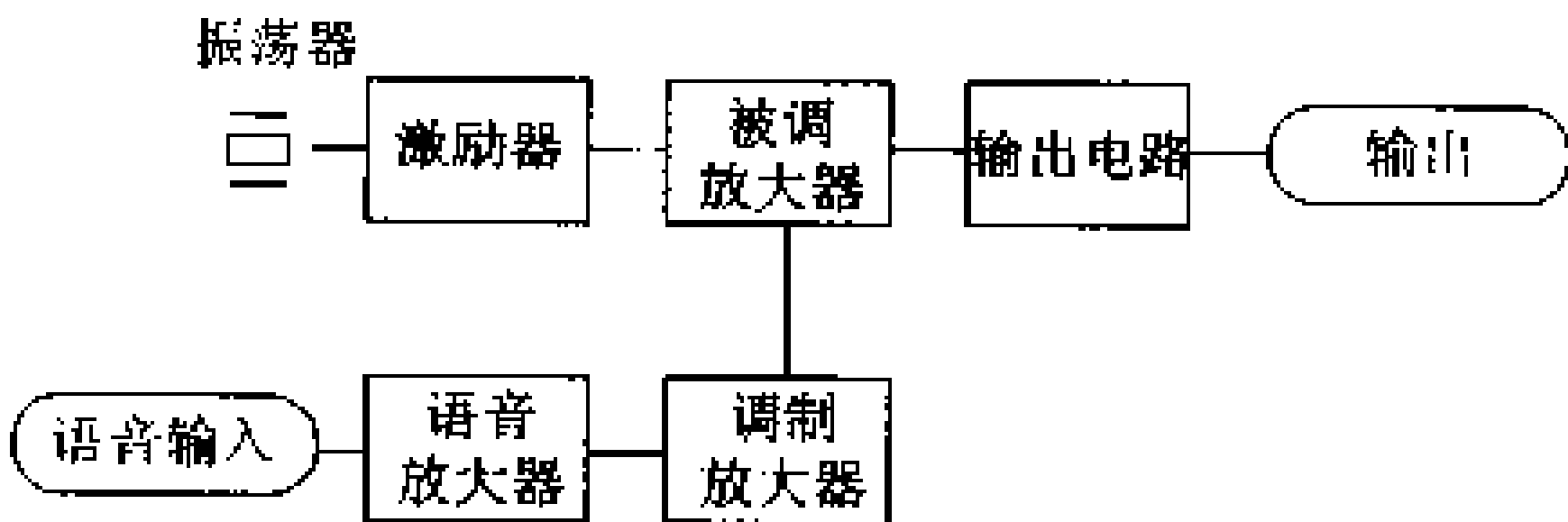


图 9.14 无线发射机的构成

● 发射台的构成

发射机安置在发射台里，发射台的构成如图 9.16 所示。演播

室(播音室)与发射台之间由有线线路或无线线路相连接,送到发射台的语音信号在发射机中调制、放大后由天线发射出去。几乎所有的发射台都建在远离演播室的地方,通过远距离监控的办法实行无人管理式运行。

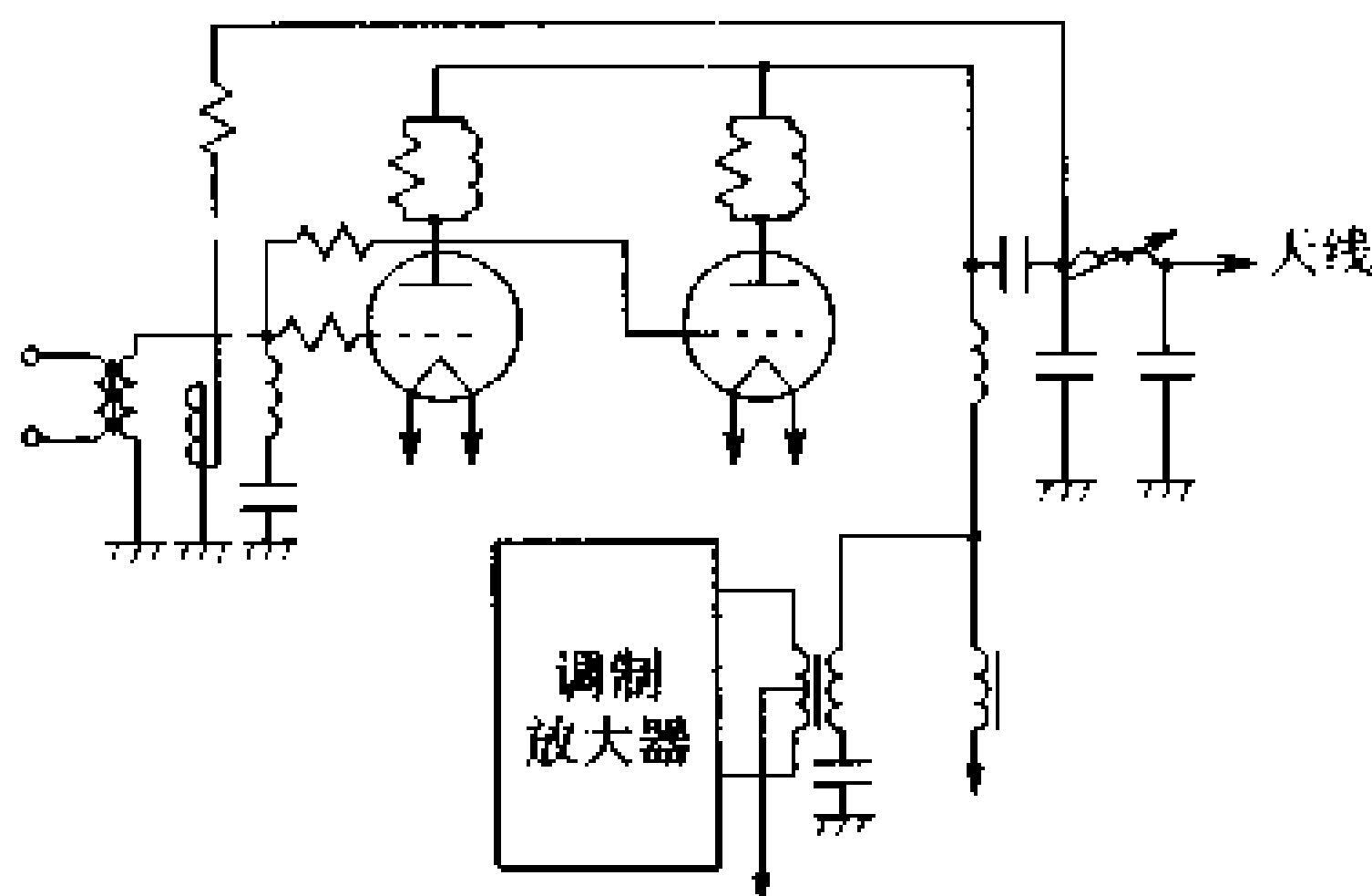


图 9.15 末级板极调制

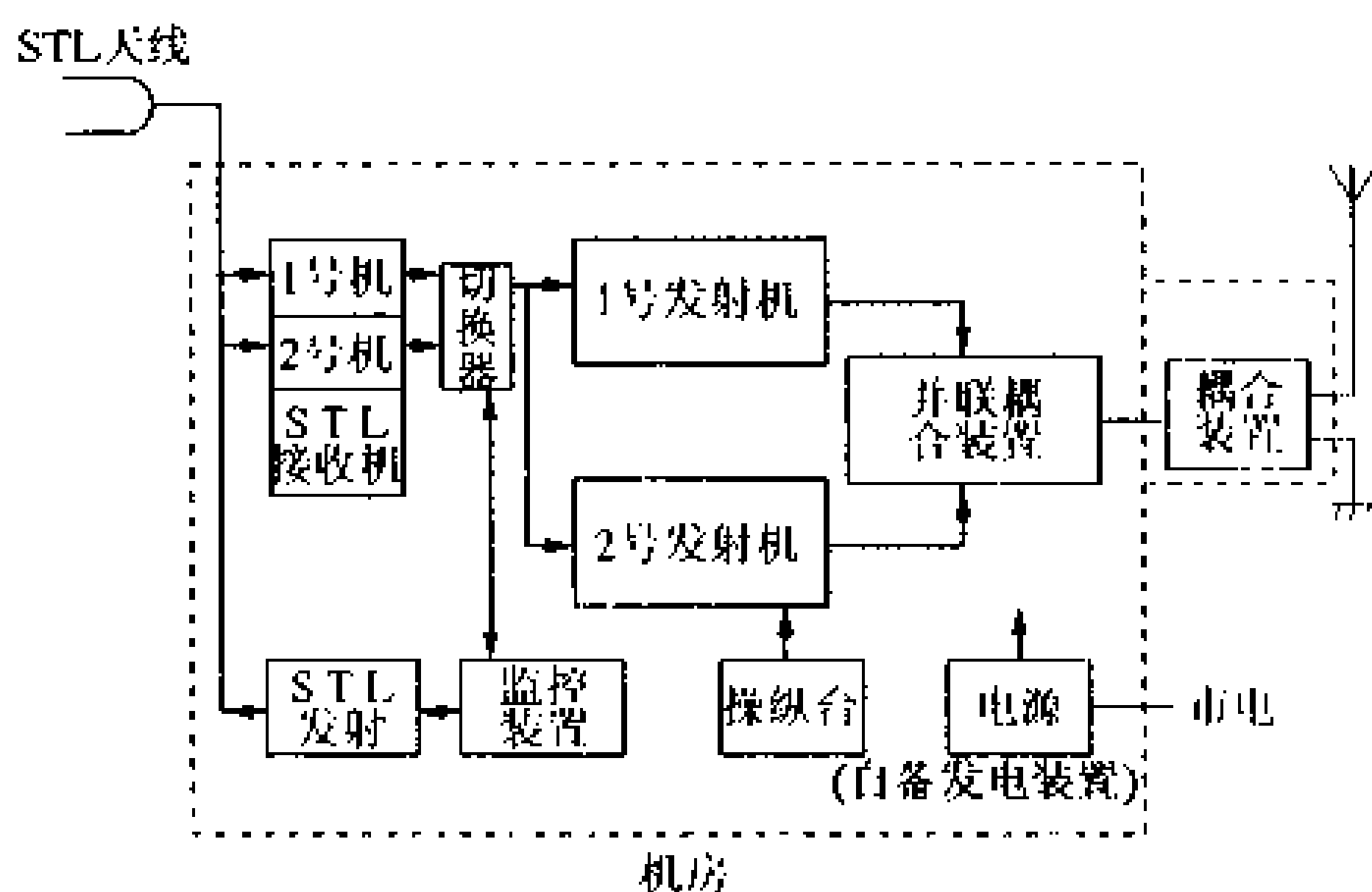


图 9.16 发射台的构成

### ● 超短波广播

超短波广播的频段是  $76\text{MHz} \sim 90\text{MHz}$  中的  $76.1\text{MHz} \sim 89.9\text{MHz}$ ,按  $100\text{kHz}$  一个间隔分为 139 个频道。广播方式采用频率调制(FM 方式)和单声道播放或双声道立体声播放的方式。

超短波电波的传播没有电离层反射,只有视距范围内的直接波,因而干扰较少。调频方式需要的频带虽然宽,但噪声小、音质好,适合于播放音乐节目。

单声道广播  
立体声广播

单声道广播是用一个语音信号去调制一个载波的调频广播方式；立体声广播是用左右两个语音信号以复用方式去调制一个载波来进行发射，到了接收端再把原来的两个语音信号分离开来。这是一种能使音乐产生立体感的调制方式。

● 立体声广播方式

为了与单声道广播兼容，常采用加入导频信号的载波抑制AM-FM方式。图 9.17 所示为调制信号的频谱分布。立体声信号的 L 信号(左声道信号)和 R 信号(右声道信号)通过矩阵电路后，得到的和信号(L+R)作为主信号，差信号(L-R)对 38kHz 副载波进行平衡调制后作为副信号；由于副信号中不含副载频，所以要加一个 19kHz 导频信号。这三个信号所合成的复合信号在发射机中进行调频后发射出去。图 9.18 示出立体声发射的系统图。

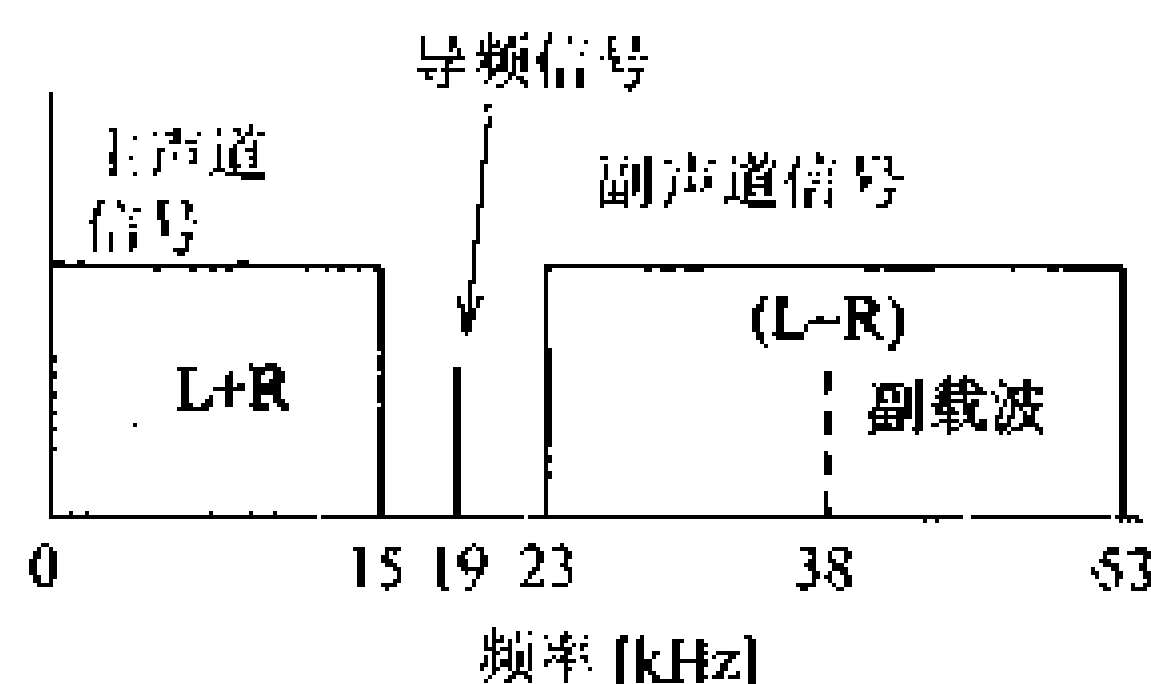


图 9.17 FM 立体声信号

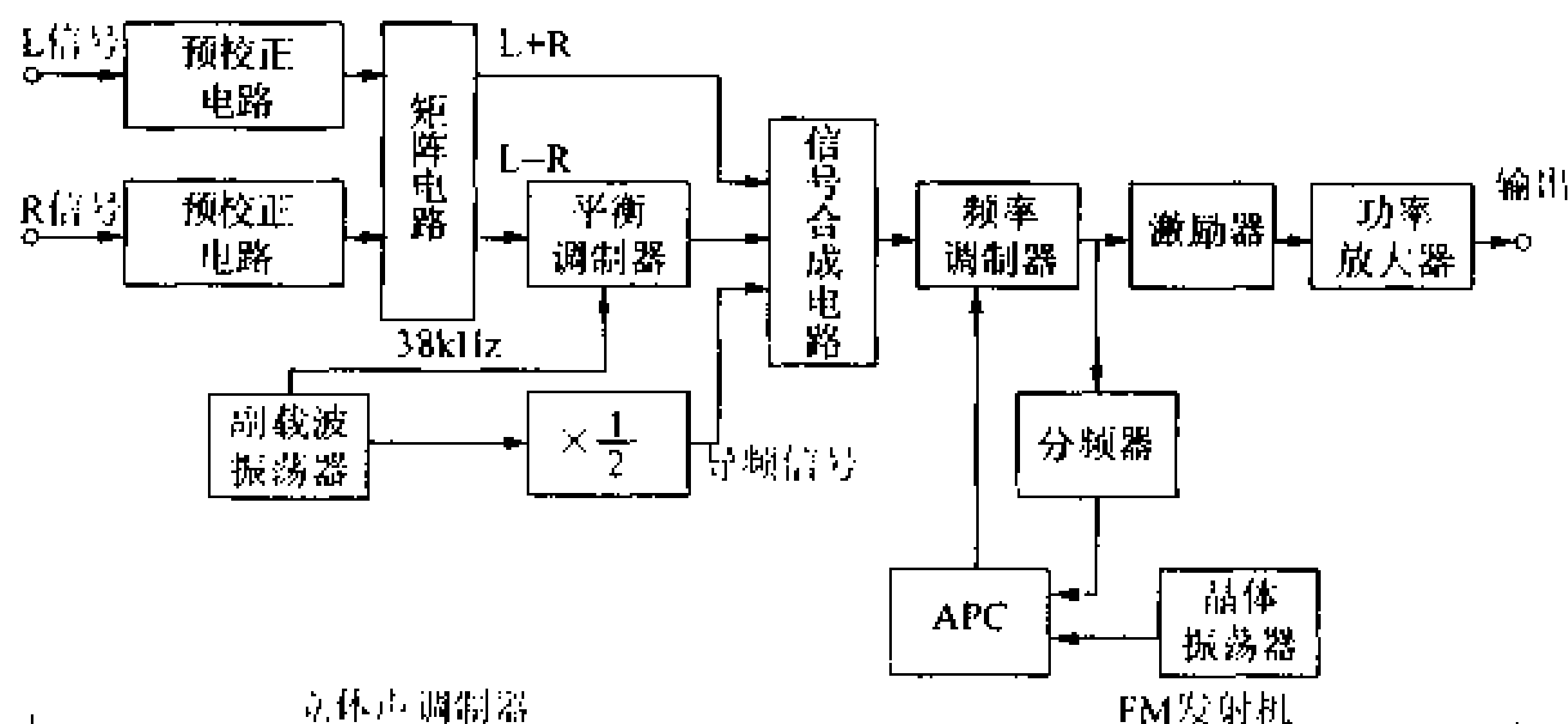


图 9.18 FM 立体声发射机的系统图

图 9.19 是立体声接收机的系统图。(L+R)信号直接从低通滤波器得到,(L-R)信号则是通过给带通滤波器输出的平衡调制信号加上 38kHz 副载波后从检波器输出得到,这两个信号在矩阵电路中相加、减后得到立体声双声道信号的 L 信号和 R 信号。

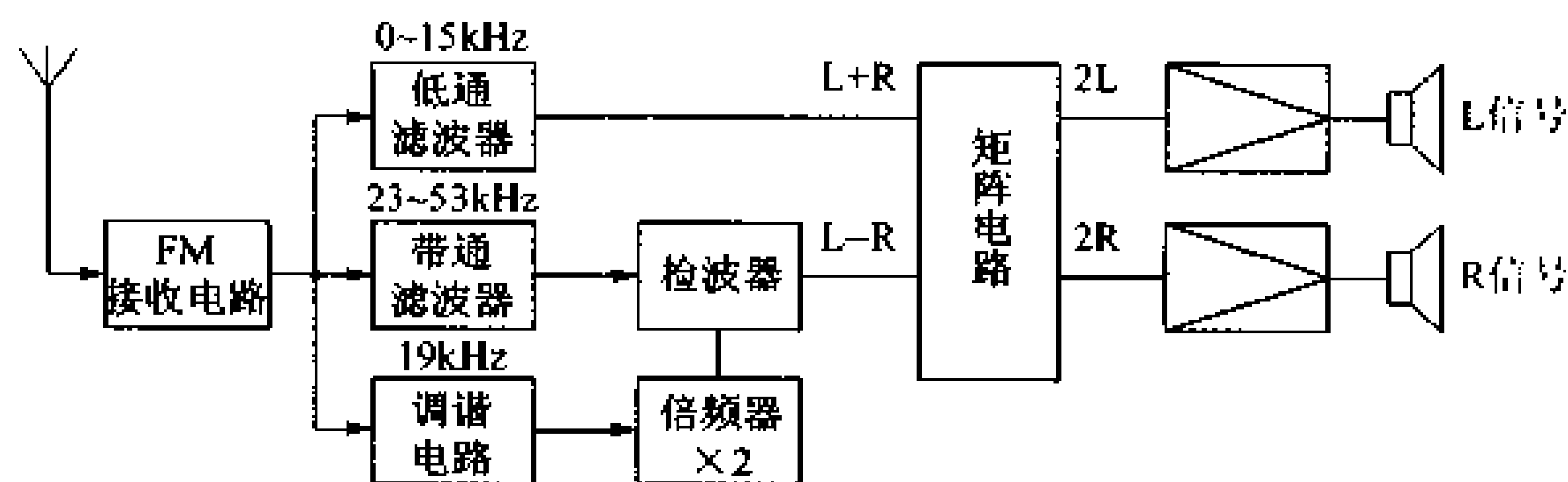


图 9.19 FM 立体声接收机的系统图

## □ 相关知识 ● AM 立体声广播

兼容性正交调  
幅方式  
(摩托罗拉方式)

中波 AM 立体声广播已经实用化了,民营电台于 1992 年正式实行 AM 立体声广播。AM 立体声方式有摩托罗拉方式、哈里斯方式、卡恩方式等,各种方式都与单声接收机具有兼容性。日本的 AM 立体声广播是兼容性正交调幅方式(摩托罗拉方式)。兼容性正交调幅方式是用和信号和差信号进行正交调制,去除其合成信号的振幅变化部分,而其载波采用和信号进行振幅调制的方式,它对包络检波式单声道接收机具有兼容性。

## ● 无线广播的分类

这是平时接触最多的无线通信系统中的一个问题。只播放语音和音乐等语音信号的无线广播,按照电波法规,其分类如下:

### ① 中波广播(标准广播)

用 526.5kHz~1606.5kHz 的载波播送语音信号的广播。

### ② 短波广播

用 3.9MHz~26.1MHz 频段中分配给短波广播的频率播送语音信号的广播,包括国内和国际广播。

### ③ 超短波(FM)广播

用 30MHz 以上的载波播送语音信号的广播,包括立体声广播和单声道广播。

# 6 电视原理

□ 要 点

电视是专门传送图像信息的系统。发送端把投射到摄像机上的图像亮度和颜色变换成电信号传送出去,接收端再把这种电信号用显像管变换成光的亮度和颜色,从而重现原图像。

电视有黑白电视和彩色电视之分,日本采用的是 NTSC 制式。(中国采用的是 PAL 制式)。

□ 解 释

● 图像的传送

电视的原理是先用电视摄像机把图像分解为称作像素的小面积,得到称为图像信号(视频信号)的电信号,并将这种电信号用有线或无线方式传送出去。到了接收端再重新由电信号组装成图像。图像分解或组装的过程称为扫描。为了使接收端得到正确的再现图像而采用了一种特殊信号,该信号称为同步信号。

● 扫描与隔行扫描

图像的分解和组装是由电子束按图 9.20 所示的方向从左到右、从上到下高速扫描画面来实现的。横向扫描称为水平扫描,纵向扫描称为垂直扫描,扫描所走过的直线称为扫描线。扫描线越多、扫描速度越高,传送的图像就越逼真,闪烁感越小。NTSC 制式电视中,水平扫描的重复频率为 15750Hz,垂直扫描的重复频率为 60Hz,扫描线总数为 525 条。

扫描  
同步信号

水平扫描  
垂直扫描  
扫描线

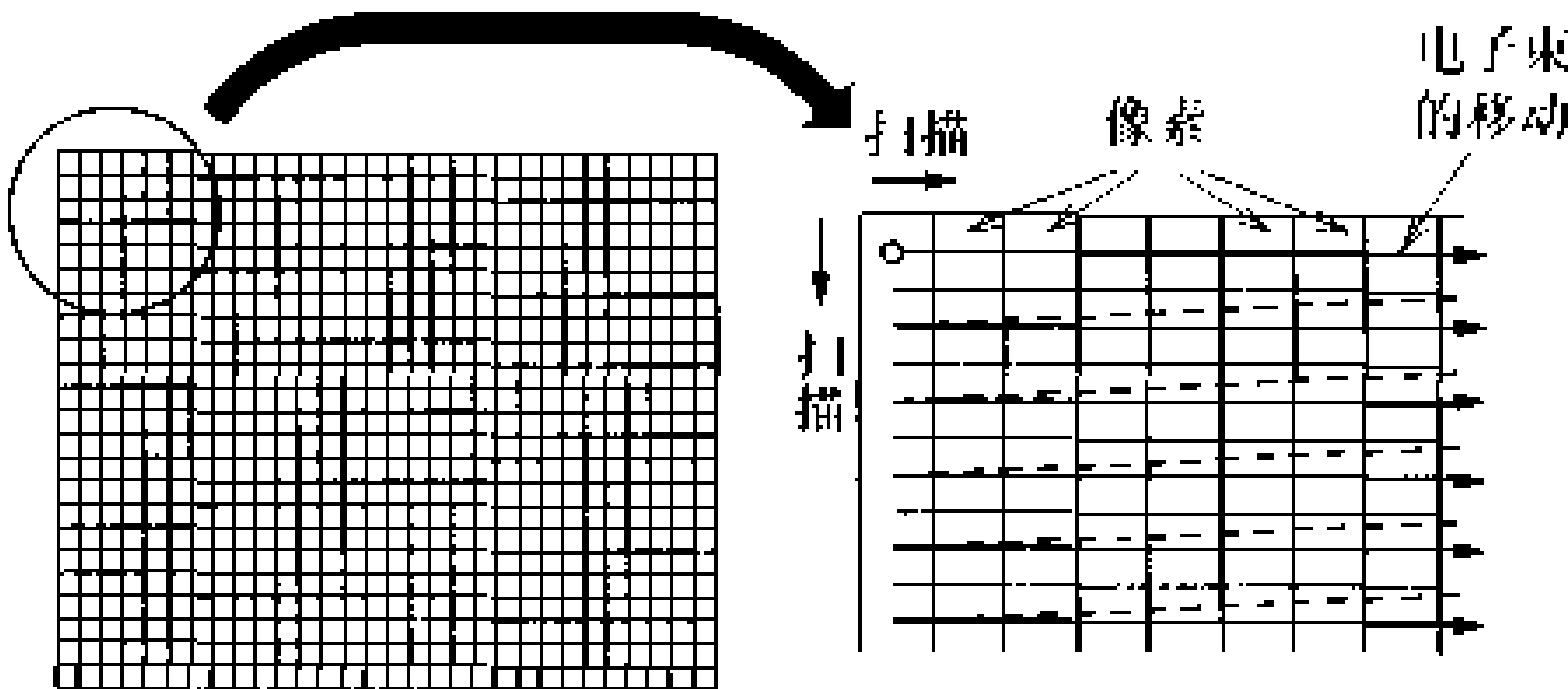


图 9.20 像素和扫描

NTSC 制式每秒钟传送的图像是 30 幅。为了减轻画面闪烁感,实际的扫描方法采用了图 9.21 所示的跳过一行的办法。首先在 1/60 时间里用 262.5 行扫完一幅画面,这次扫描称为奇数场扫描。然后,再用 1/60 秒的时间扫完奇数场剩下的 262.5 行,这次



## 隔行扫描

扫描称为偶数场扫描。两场扫描在人眼视网膜上的效果是一幅线数为 525 线的合成图像。这种扫描方式称为隔行扫描。这样,虽然接收到的图像是每秒 30 幅,但实际上是按每秒 60 幅投射到人眼上的,因而看到的图像闪烁感大为降低。

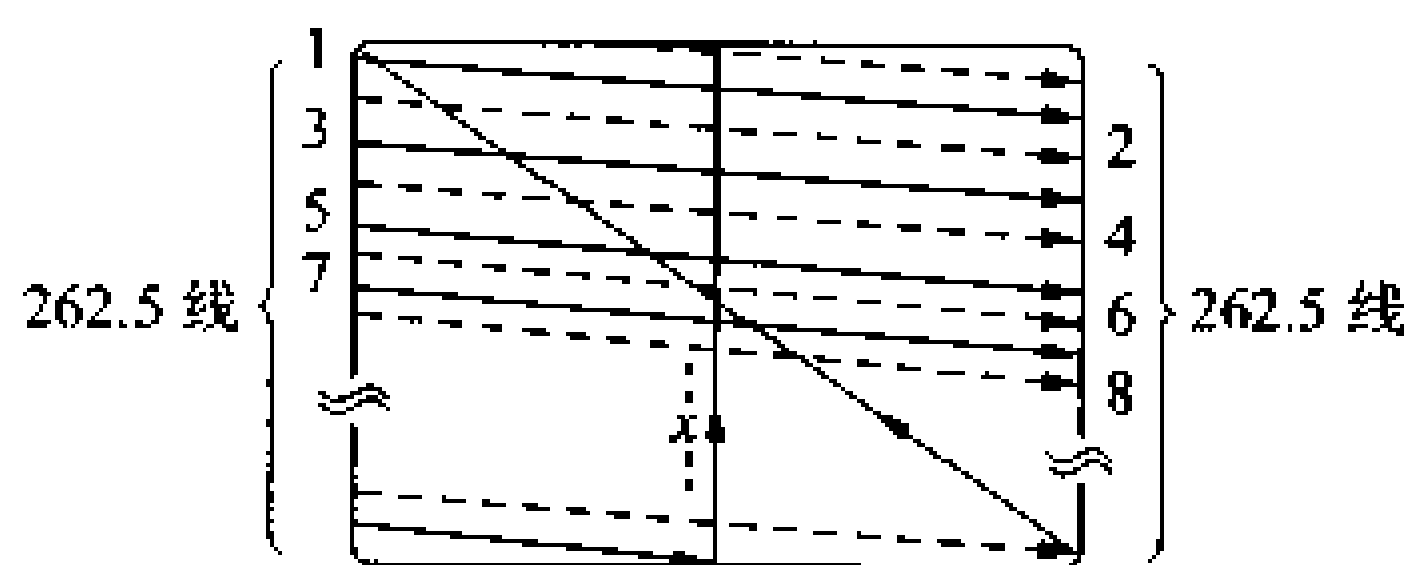


图 9.21 隔行扫描

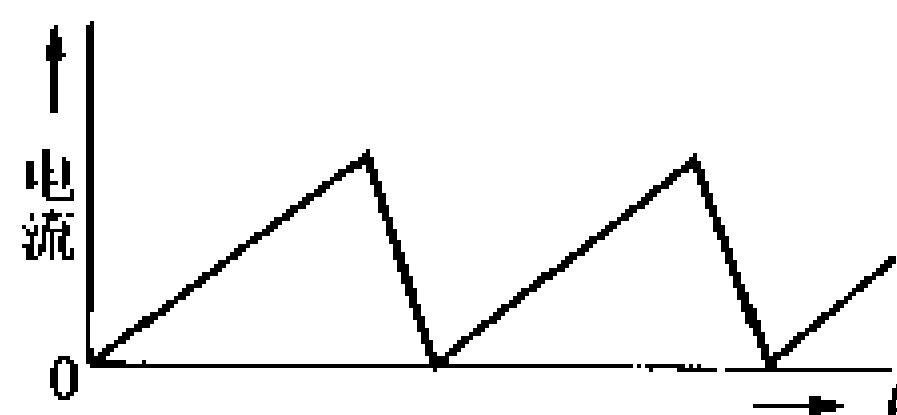


图 9.22 锯齿形电流

### ● 水平偏转电流和垂直偏转电流

为了使电子束在摄像管或显像管中按规定的方向上下左右偏转,需要有图 9.22 所示的锯齿形电流。为了在显像管上重现接收到的图像,需要使光点在水平和垂直方向上移动。水平方向移动所需的电流称为水平偏转电流,其波形如图 9.23(a)所示;垂直方向移动所需的电流称为垂直偏转电流,其波形如图 9.23(b)所示。这种电流流过安装在显像管颈外面的水平偏转线圈和垂直偏转线圈,电子束就能按从左到右、从上到下的规律移动。水平偏转电流的频率为  $525 \times 30 = 15750\text{Hz}$ ,垂直偏转电流的频率为  $30 \times 2 = 60\text{Hz}$ 。

水平偏转电流  
垂直偏转电流

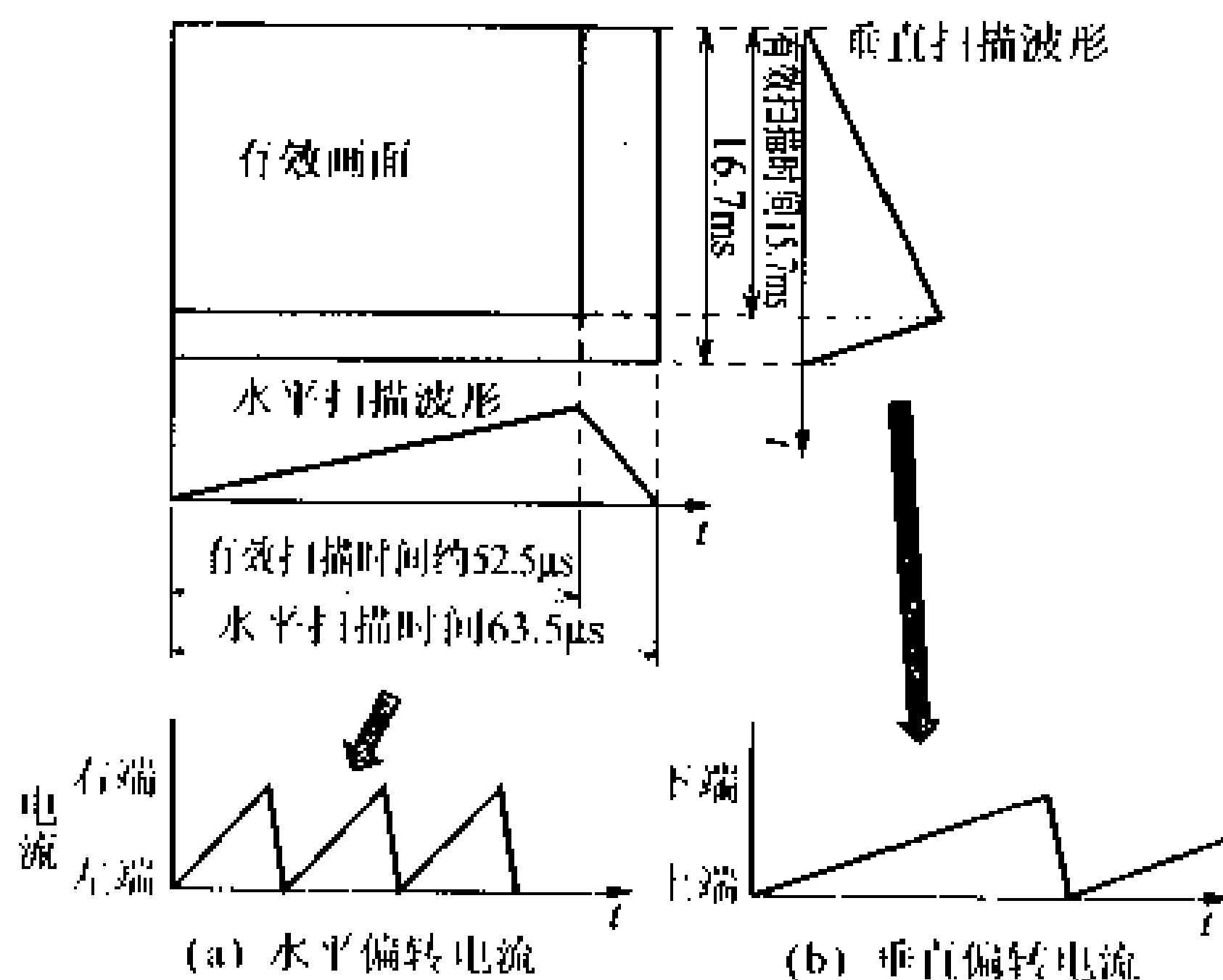


图 9.23 偏转电流的波形

有效扫描线长度  
有效扫描线数  
回扫时间

● 有效扫描线数

接收端的重现图像是由横向扫描线的光栅构成的。构成一幅画面光栅的扫描线的长度称为有效扫描线长度,构成一幅画面的扫描线数称为有效扫描线数。从一次扫描结束到下一次扫描开始的时间称为回扫时间,为了不让回扫光栅出现在画面中,需要用回扫消隐信号。按规定标准,水平回扫消隐时间不能超过水平扫描时间的 18%,垂直回扫消隐时间不能超过垂直扫描时间的 8%。图 9.24 是有效扫描线数和回扫消隐时间的示意图。

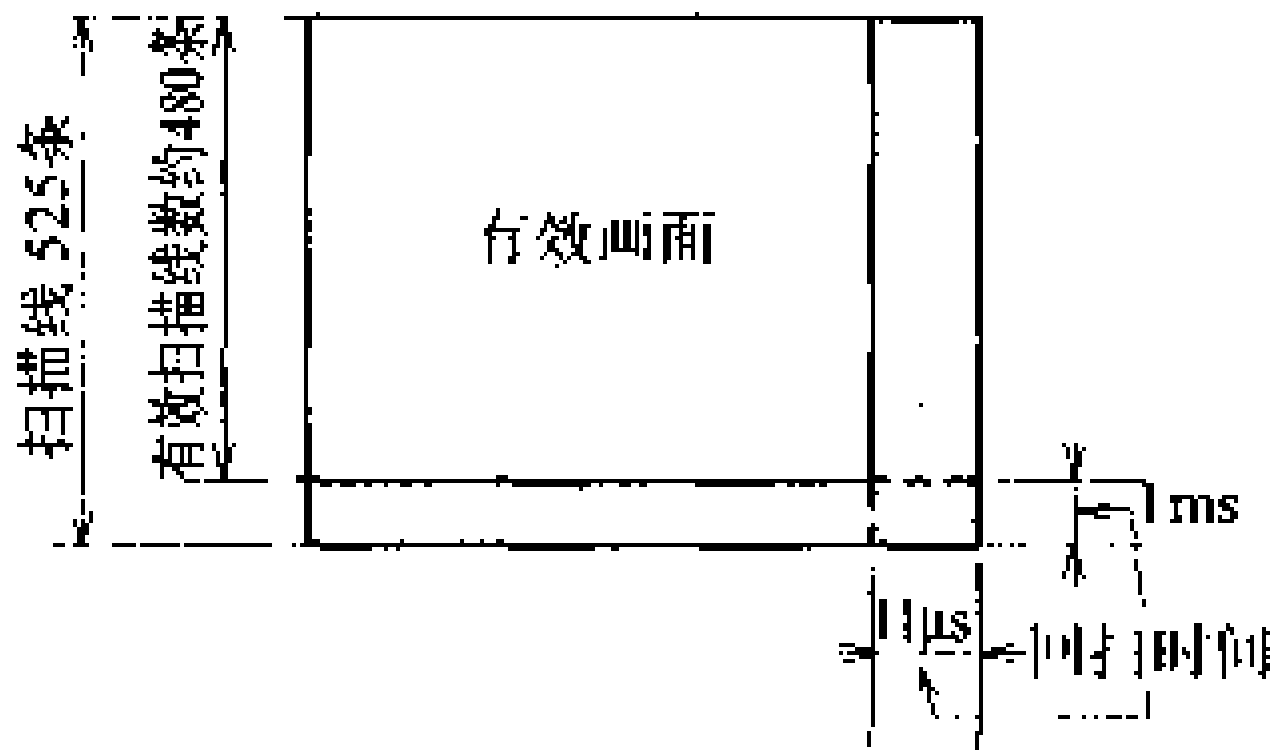


图 9.24 有效扫描线数和消隐时间

同步

● 图像信号和同步信号

当用摄像机摄取图 9.25(a)的图像时,其输出为图 9.25(b)所示的电压信号。这就是图像信号,图像亮的地方对应于信号的白电平,暗的地方对应于黑电平。回扫期间的信号比黑电平还低,是因为回扫线被消隐信号彻底消去的缘故。迫使显像端的扫描时间与摄像端相一致的措施称为同步,如果同步定时不准,就难以重现原图像。

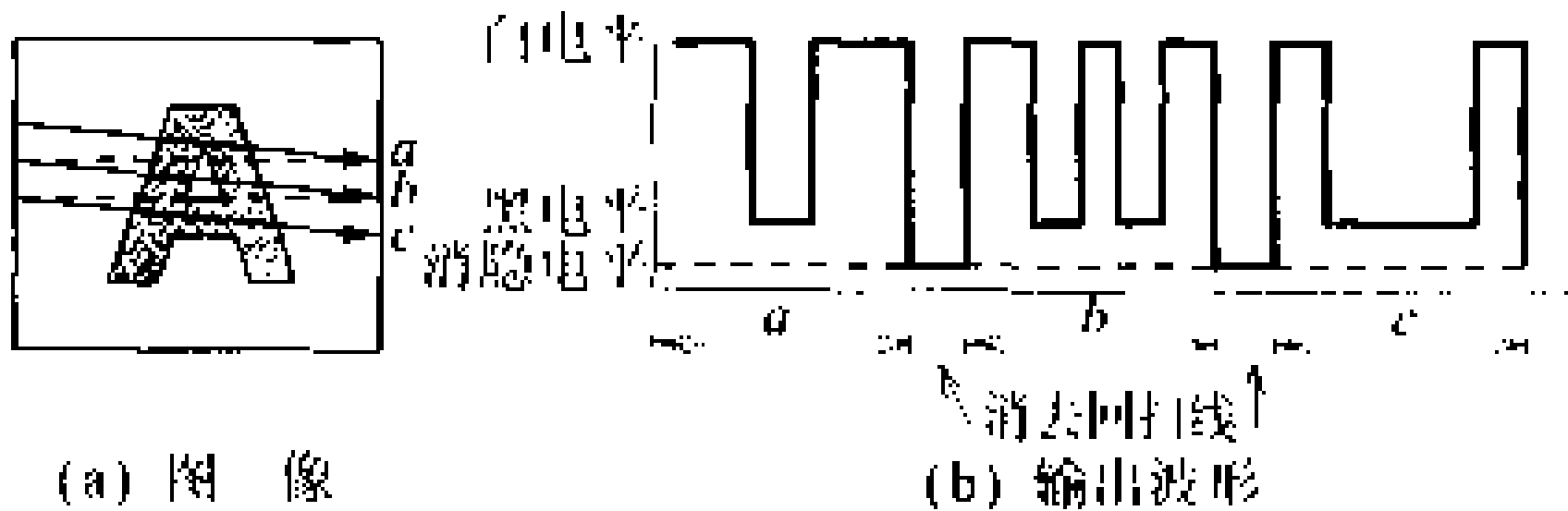


图 9.25 图像信号

水平同步  
垂直同步

因此,要正确重现原图像,发送端就要在传送图像信号的同时再传送一个同步信号。同步信号有水平同步和垂直同步两部分。图9.26是含有同步信号和消隐信号的图像信号,这就是说,电视

## 图像信号

信号是由图像信号、同步信号和消隐信号复合而成的,称为复合图像信号,也简称为图像信号。

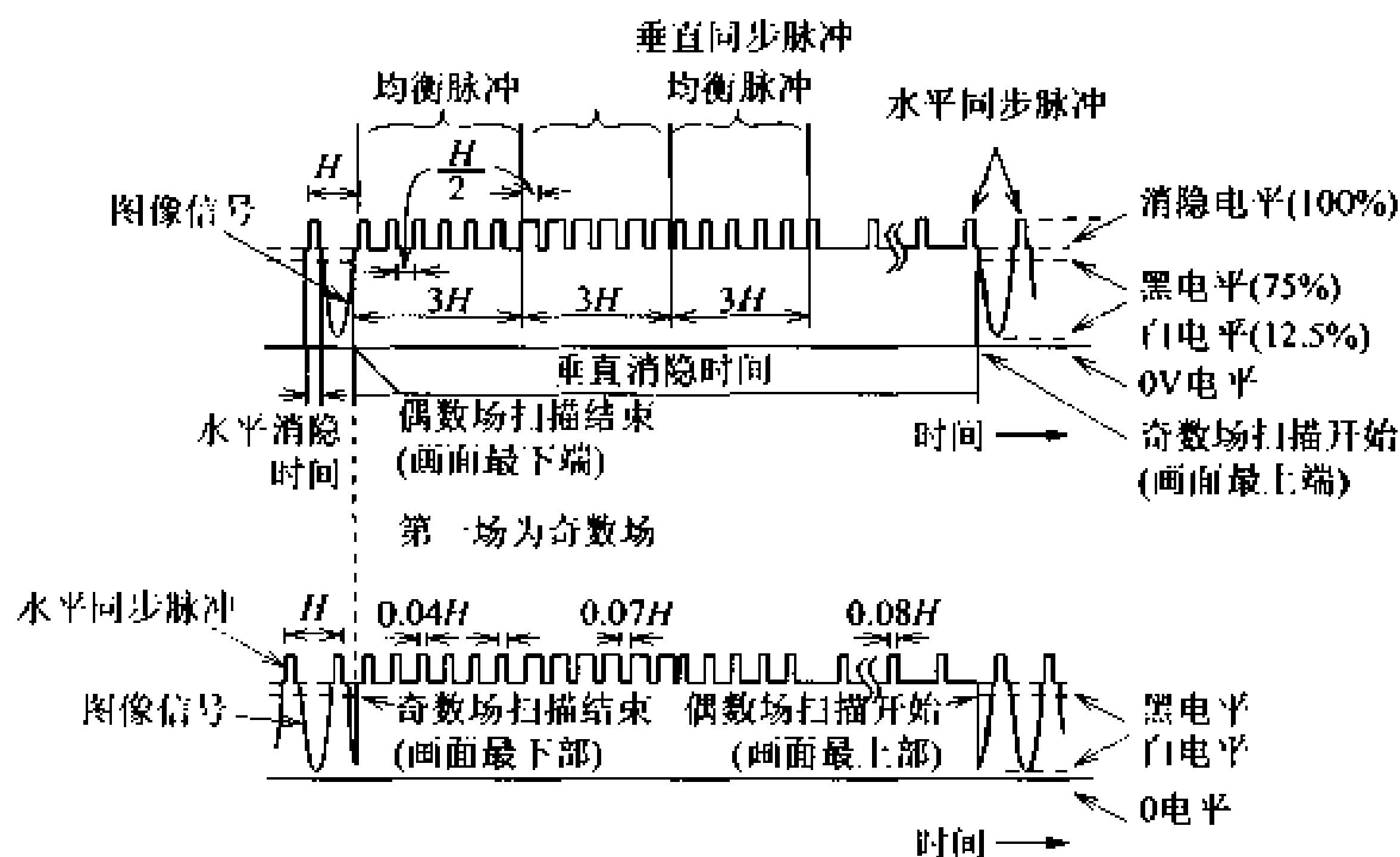


图 9.26 含有同步信号的图像信号

### ● 彩色电视的原理

红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色搭配可以得到各种颜色。彩色电视就是应用光的这种三基色原理来形成彩色图像的。用图 9.27 所示的彩色电视摄像机把所能得到的所有颜色都分解成红、绿、蓝三基色,然后以与黑白电视相同的方式传送出去,接收端再采用三基色合成的办法,就可以得到彩色图像。不过,这种方式需要的频带相当于黑白视频频带的三倍,因此,NTSC 制彩色电视中采用了如下的办法来节省带宽,即将三基色信号变换成一个亮度信号 Y 和两个色度信号 I 和 Q,通过亮度信号和色度信号的配合来达到能用与黑白电视相同的带宽来传送彩色电视信号的目的。

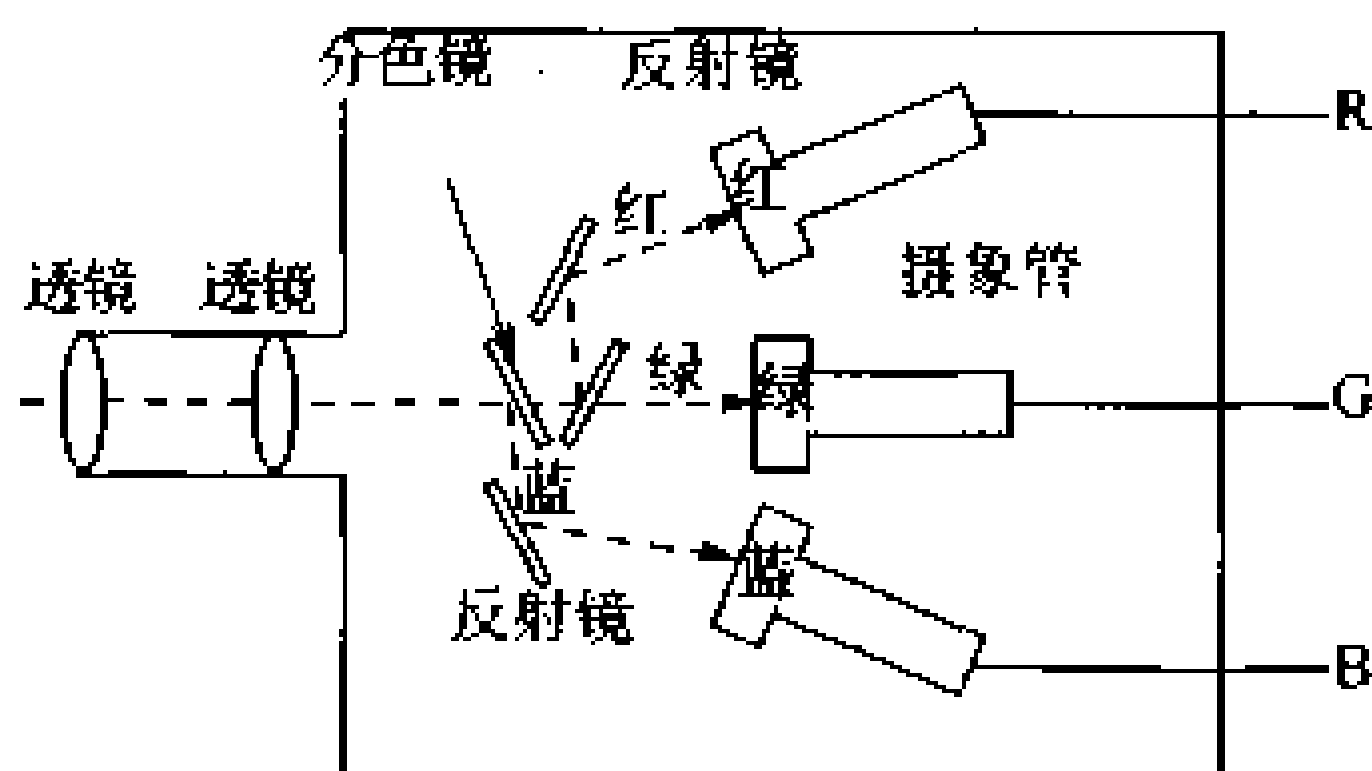


图 9.27 彩色电视摄像原理

## ● NTSC 制式

NTSC 制是美国电视委员会(NTSC: National Television System Committee)提出的美国电视标准制式。制式规定,将  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三基色信号按下式变换为  $Y$ 、 $I$ 、 $Q$  信号:

$$Y=0.30R+0.59G+0.11B \quad (9.4)$$

$$I=0.60R-0.28G-0.32B \quad (9.5)$$

$$Q=0.21R-0.52G+0.31B \quad (9.6)$$

这三个信号的带宽分别为 4.0、1.5、0.5MHz。 $Y$  信号采用与黑白电视相同的方式传送。两个色度信号以正交平衡调制方式调制在大约为 3.58MHz 的彩色副载波上,并以图 9.28 所示的频谱与亮度信号一起传送。NTSC 制式具有彩色电视与黑白电视兼容的特性。

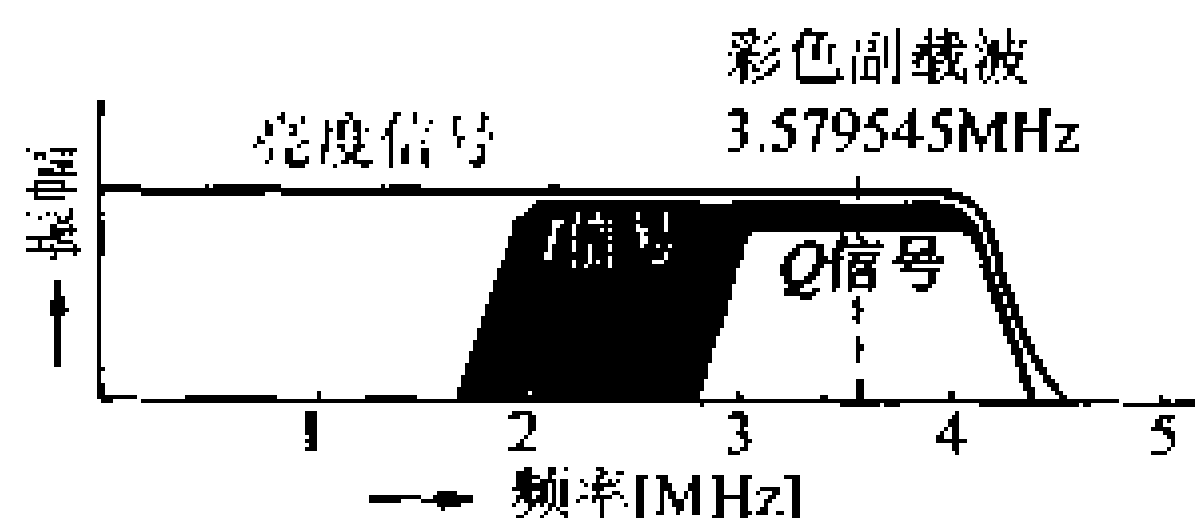


图 9.28 NTSC 制彩式电视信号的频谱

## □ 相关知识 ● 世界各国的电视制式

除了 NTSC 制式外,电视制式还有 PAL 制、SECAM 制。各个国家所采用的图像带宽和调制方式有所不同,中国、英国、意大利、德国等国采用的是 PAL 制,扫描线数为 625 线,法国、俄罗斯、匈牙利等国采用的是 SECAM 制,扫描线数为 625 线。

## ● 颜色的三属性

颜色有三个性质。表示红、黄、蓝等颜色种类的称为色调,表示颜色鲜艳程度或深度的称为饱和度,表示其明亮程度或强度的称为亮度(也称为灰度)。色调和饱和度合在一起称为色度。

## 7 电视广播

### □ 要 点

与无线电广播一样,电视广播也是以公众直接收看为目的,播放图像的同时还播放伴音。此外,还有立体声电视、双语种伴音电视等语音多重电视广播和图文电视广播等。

### □ 解 释 ● 广播电视系统

电波法规给广播电视下的定义是“播送静止或移动事物的实时图像及与之相伴的声音和其它音响的系统”。

其系统构成如图 9.29 所示,电视摄像机所摄取的图像和拾音器所拾取的声音被转换成电信号,经发射机以电波的形式从天线发射出去。接收端将收到的电波在接收机内加以处理,转换成重现的图像和声音。

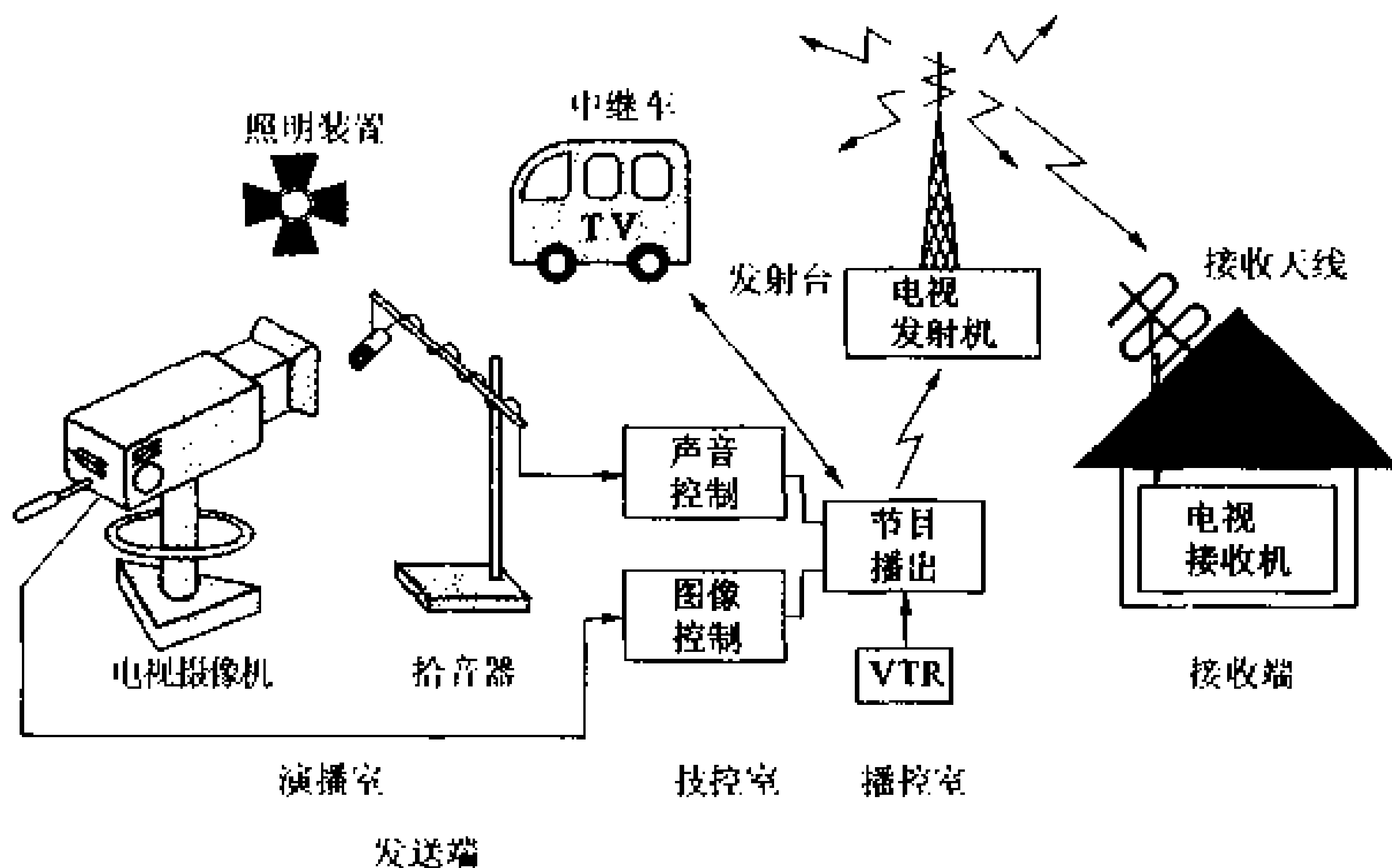


图 9.29 广播电视系统

### ● 电视发射机

图 9.30 示出 NTSC 制彩色电视发射机的构成。由于图像信号的频谱很宽,所以载波采用 VHF 和 UHF 波段的频率。调制方式采用图 9.31 特性的残留边带振幅调制,调制极性有正负两种,日本采用的是负极性调制方式。声音信号的载波采用频率调制方

残留边带振幅  
调制

式。(中国的 PAL 制也是采用图像信号负极性残留边带振幅调制,声音信号采用频率调制)。

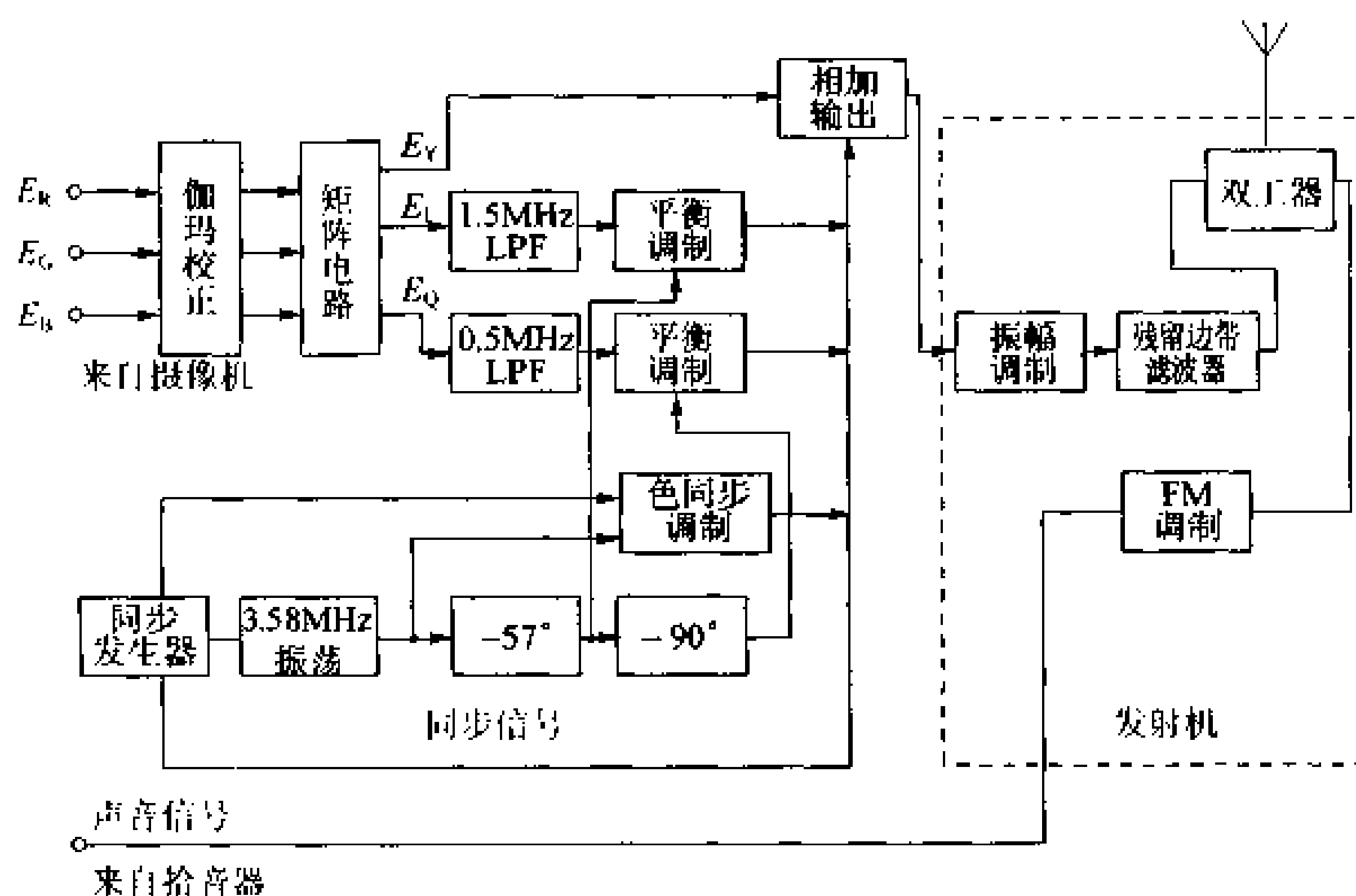


图 9.30 彩色电视发射机的构成

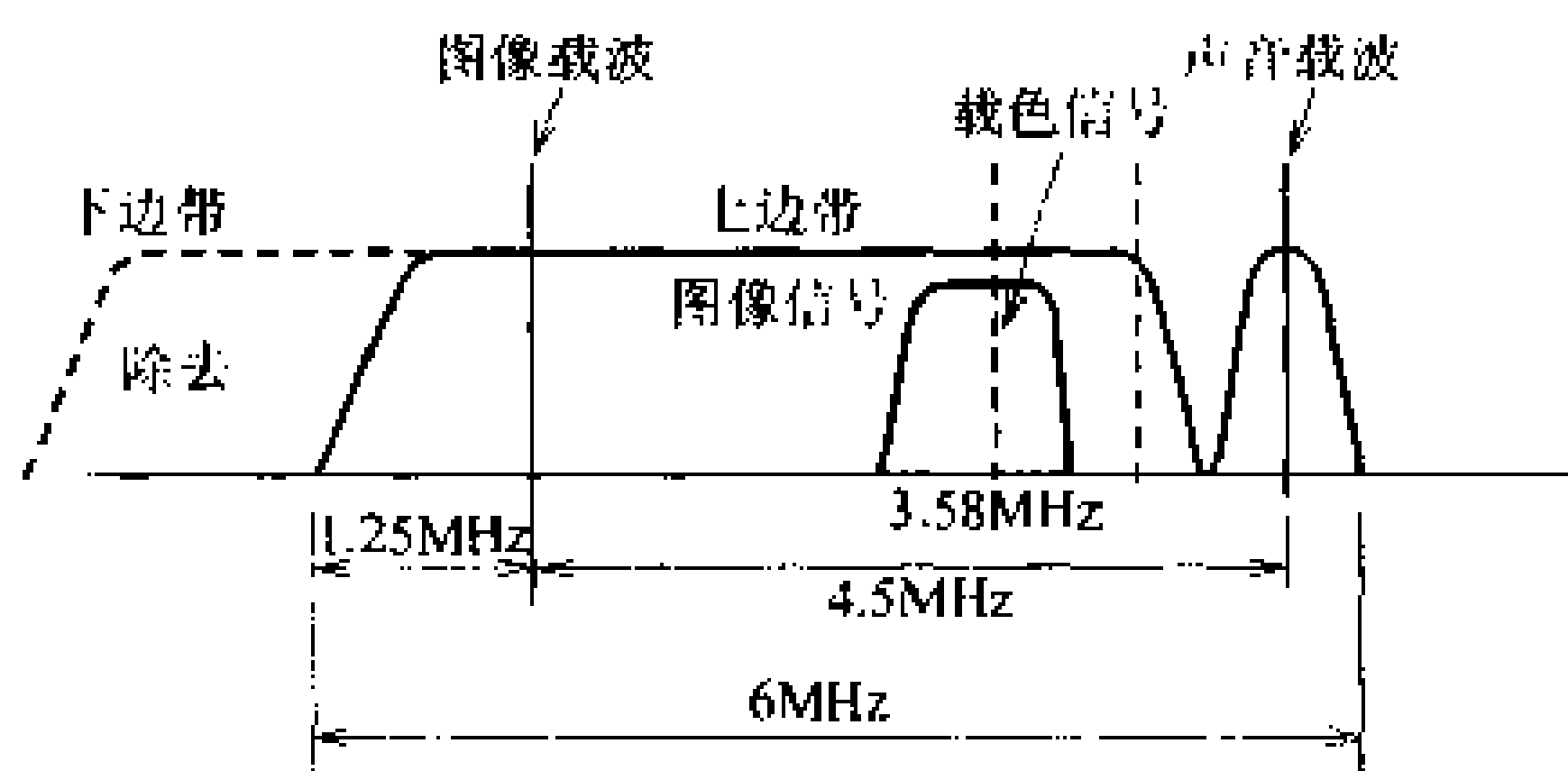


图 9.31 残留边带特性

### ● 彩色电视接收机

图 9.32 为 NTSC 制彩色电视接收机的构成。接收到的电波经频率变换、放大、解调后得到图像信号,从图像信号分离出  $Y$ 、 $Q$ 、 $I$  信号,矩阵电路从  $Y$ 、 $Q$ 、 $I$  解出  $R$ 、 $G$ 、 $B$  信号后加到彩色显像管上,得到重现的彩色图像。声音信号经声音中频放大器放大后再经过 FM 解调,得到重现的声音。

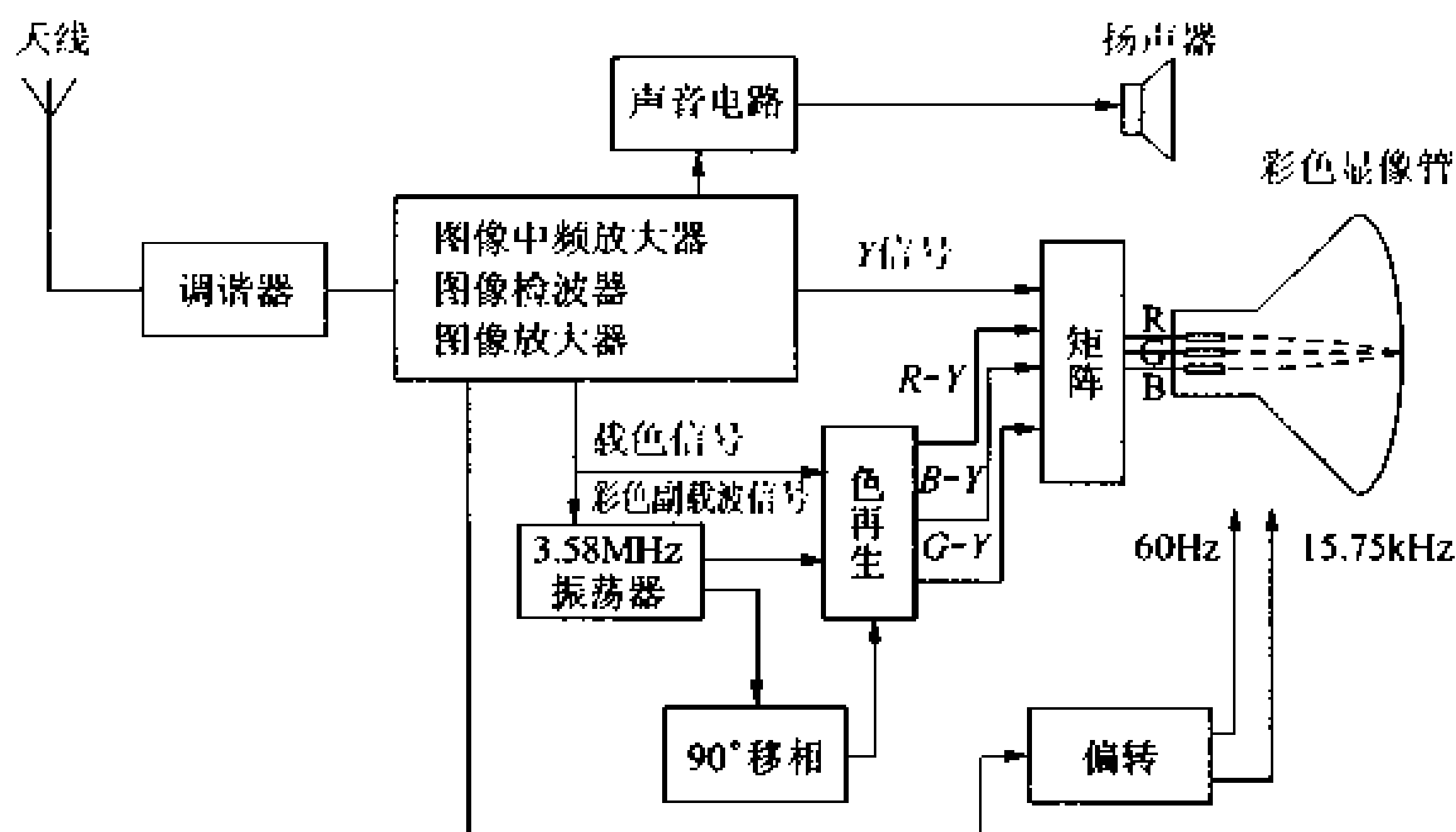


图 9.32 彩色电视接收机的构成

## □ 相关知识 ● 广播电视频道的划分

表 9.2 是日本 VHF 波段的广播电视频道。此外,还有 UHF 波段和 SHF 波段。

表 9.2 VHF 波段电视广播频道

频道 序号	频率 /MHz	基准频率/MHz		频道 序号	频率 /MHz	基准频率/MHz	
		图像	声音			图像	声音
1	90~96	91.25	95.75	7	188~194	189.25	193.75
2	96~102	97.25	101.75	8	192~198	193.25	197.75
3	102~108	103.25	107.75	9	198~204	199.25	203.75
4	170~176	171.25	175.75	10	204~210	205.25	209.75
5	176~182	177.25	181.75	11	210~216	211.25	215.75
6	182~188	183.25	187.75	12	216~222	217.25	221.75

注:7 频道和 8 频道的频带有 2MHz 重叠。

## ● 电视的历史

电视研究是 1920 年前后以欧美为中心兴旺起来的,世界上最早的电视广播于 1935 年始于德国。此后,英国和美国也开始进行广播,但由于第二次世界大战爆发,除了美国的一部分电视台之外,其它的都停止了。在日本,浜松高等工业学校的高柳健次郎先生曾在 1927 年成功地进行了 30 线扫描的图像发送接收实验,而正式的电视广播是 1953 年 2 月开始的。

# 8 高清晰度电视和高画质电视

□ 要 点

电视广播已成为日常生活中不可缺少的事物。随着生活水平的提高,对广播业务也提出了多样化的要求,因而有必要开发大画面和高画质等高质量的电视。

□ 解 释

● 提高电视图像质量的方法

提高电视图像质量的方法很多,大的方面有如下两类。

高清晰度电视  
(HDTV)

① 高清晰度电视(High Definition Television: HDTV)

把画面的宽高比提高到 5 : 3,通过增加扫描线数和加大带宽来提高大画面的图像质量。

高画质电视  
(EDTV)

② 高画质电视(Extended Definition Television: EDTV)

不改变现行电视制式的宽高比和扫描线数,通过数字技术来改善图像质量,将来再进行加宽画面等改进。

● HDTV

HDTV 是日本所开发出的高清晰度电视。与现行制式的电视相比,这种电视的画面更大、光栅更光滑细腻、色彩更鲜明、音质更好、更富有临场感、更有魅力。

为了得到光滑细腻的图像,HDTV 的扫描线增加到了 1125 线(图 9.33);为了增强临场感,其画面宽高比从现行的 4 : 3 提高到 16 : 9 而成为宽银幕。这样一来,像素数也就比现行电视制式增大了约 5.5 倍,图像信号的带宽也增大到了约 20MHz。表 9.3 示出 HDTV 与现行制式参数规格的比较。

由于 EDTV 广播需要的频带很宽,所以它将在卫星广播和 CATV 中获得应用。

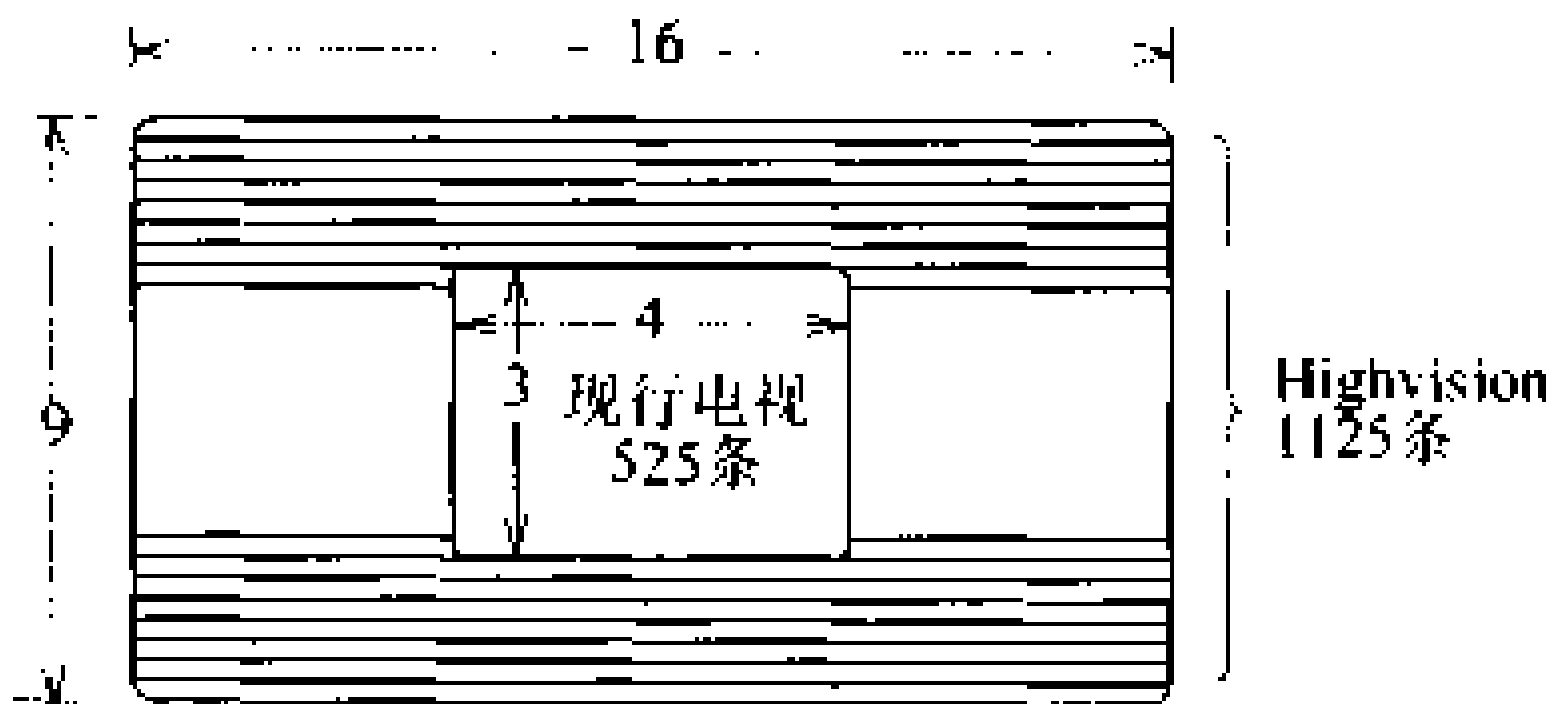


图 9.33 HDTV 与现行电视的比较



### ● EDTV

EDTV 是一种高画质电视或者高分辨率电视,亦指提高彩色电视图像质量的技术。EDTV 是通过数字技术来实现与现行制式兼容和提高图像质量的。发送端的措施是:

- ① 用高性能摄像机提高彩色图像信号的分辨率;
- ② 增强亮度信号的高频分量;
- ③ 发送端对分辨率下降进行预校正。

接收端的措施是:

- ① 扫描方式从隔行扫描变为逐行扫描;
- ② Y 信号与色副载波信号完全分离。

接收的时候,必须用相应的 EDTV 机种。

表 9.3 HDTV 与现行制式的参数规格比较

	Highvision	NTSC 制现行电视
扫描线数(根)	1125	525
画面高宽比	9 : 16	3 : 4
隔行比	2 : 1	2 : 1
每秒图像数(幅)	60	60
图像信号带宽(MHz)		
亮度信号	20.0	4.2
宽带色信号	7.0	1.5
窄带色信号	5.5	0.5
声音信号调制方式	4 声道 PCM	2 声道 FM

### □ 相关知识 ● MUSE 方式

对 HDTV 图像信号进行 FM 调制的情况下,电波的占有频带大约需要 60MHz,而卫星广播的一个频道带宽只有 27MHz,因而无法传送这种信号。MUSE 方式就是解决这一问题的一种方法。首先把图像信号数字化,然后抽取信号的一部分作为图像信息,以此将传输频带压缩到 1/4,从而使电波占有带宽不超过 27MHz。

## 9 卫星广播和 CATV

### □ 要 点

1957 年,前苏联首次发射了人造卫星。此后,美国于 1962 年发射了以通信为目的的人造卫星,实现了电视卫星中继。把人造卫星发射到赤道上空约 36000km 的静止轨道上,并从星上进行广播业务,这就是卫星广播。

CATV 包括以解决山区或高楼区收视困难问题为目的而采用同轴电缆把电视节目送到各个家庭的电视,和以自办广播或收费电视为目的的有线电视。

### □ 解 释 ● 卫星广播

如图 9.34 所示,卫星广播是这样一种广播系统:它由位于赤道上空的广播卫星把所接收到来自广播中心等地面节目发射台的电波变换成 12GHz 波段的 SHF 电波重新发回地面,从而使各个家庭或公用接收设备能够直接接收电视节目。地面节目发射台采用大口径抛物面天线向卫星发送节目和指令,以及接收卫星发回的遥测信号。家用接收天线可采用小型抛物面天线或平面天线。

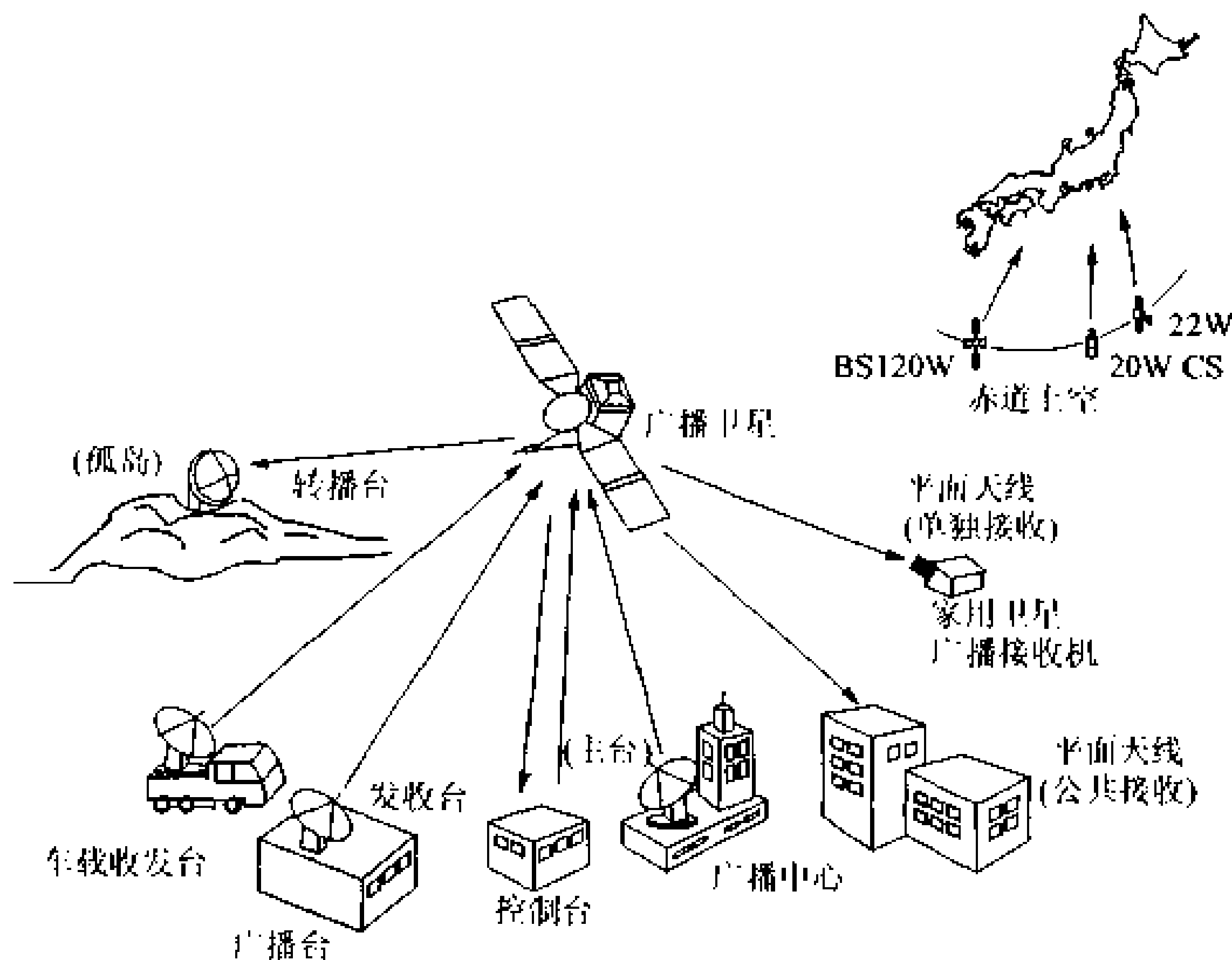


图 9.34 卫星广播的组成

BS

CS

卫星广播有两类,一类是 BS(satellite broadcasting system),接收频率为 11.7GHz~12.2GHz;另一类是 CS(communications satellite),是播放新闻、电影、体育等特定节目的,接收频率为 12.5MHz~12.7MHz。

### ● CATV

CATV(community antenna television 或 common antenna television)最初是为了解决收视困难地区的问题而开发的。在收视困难地区的山顶或高楼顶等电波较强的位置上安装天线,从这里用同轴电缆把广播节目转送给各个家庭。后来,由于采用电缆能够传送大量的图像信号、语音信号和数据信号,CATV 便成了具有向特定地区进行电视转播、自办节目及地方节目的有线电视(cable television)。

有线电视

## □ 相关知识 ● 卫星广播的特点

卫星电视是从宇宙空间发射电波,所以能解决岛屿和山区收视困难的问题。卫星电视采用 12GHz 波段的电波,其方向性强,周围也没有反射,所以接收质量高,并且传送信息也多。

### ● 双向 CATV

图 9.35 所示的双向 CATV 能够提供收费电视节目和通过家用终端享用家庭购物服务,是使各个家庭能与 CATV 中心进行对话功能的 CATV。

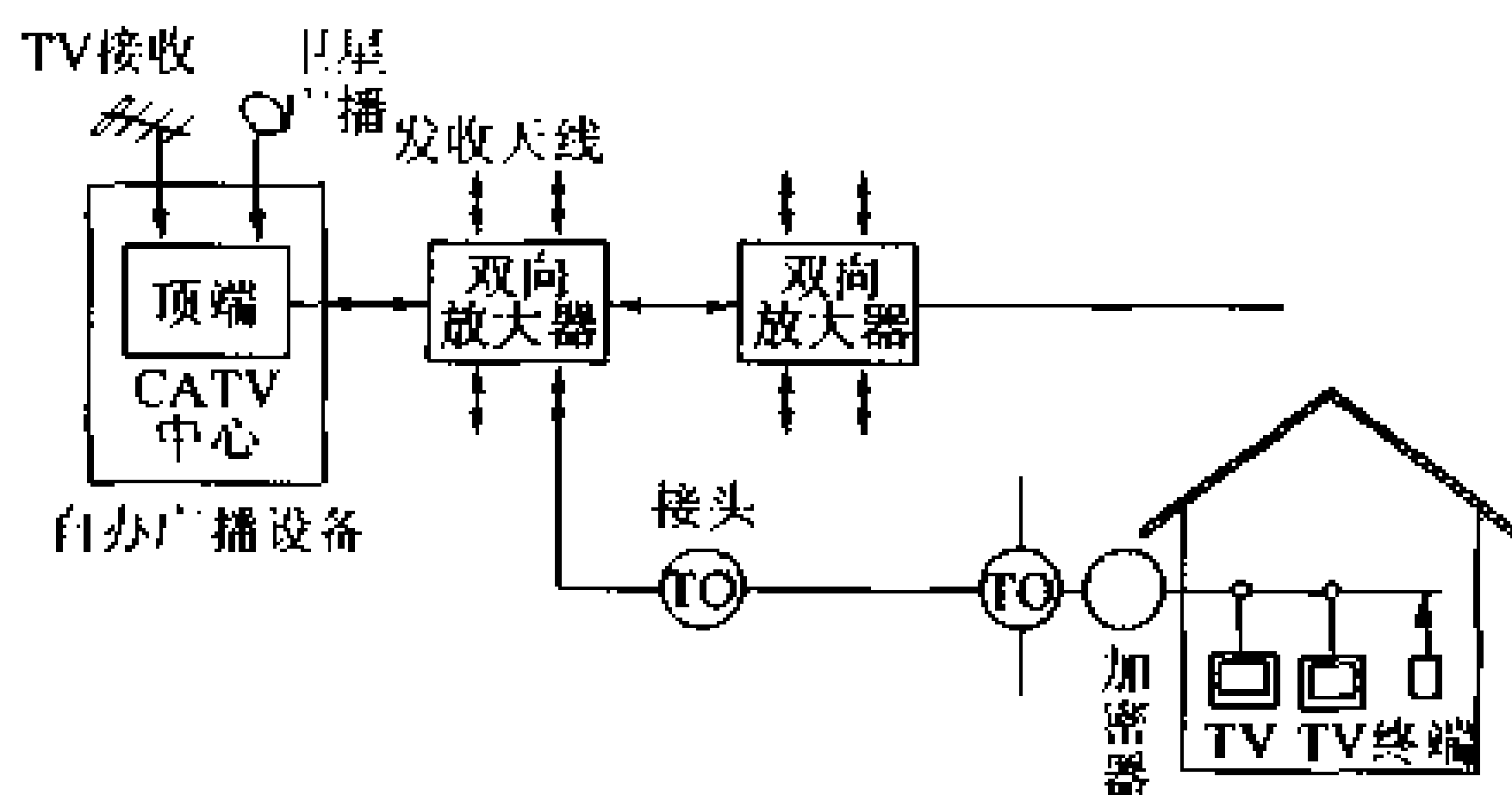


图 9.35 双向 CATV

# 10 视频磁带录像机(VTR)

## □ 要点

视频磁带录像机(video tape recorder: VTR)是用磁带记录电视频图像和声音信号并能将所记录信号重现成图像和声音的录像设备。

## □ 解释

### ● VTR 的原理

VTR 也是用磁带记录电信号的,其记录原理基本上与录音机相同。但图像信号的频带很宽,根据计算结果,其走带速度必须足够快,因此,用 VTR 记录信号的方法得另辟蹊径。

### ● VTR 的录像方式

为了使磁带的走带速度能以实用速度进行记录,必须使走带速度比看上去的速度要快。VTR 开发之初,曾采用过图 9.36(a)所示的纵向扫描旋转 4 磁头方式。此后,由于半导体技术和记录技术的发展,又开发出了图 9.36(b)的斜扫描方式。这种方式是在磁带斜着走的同时,让磁头旋转,通过记录磁迹的倾斜来提高实际记录速度。

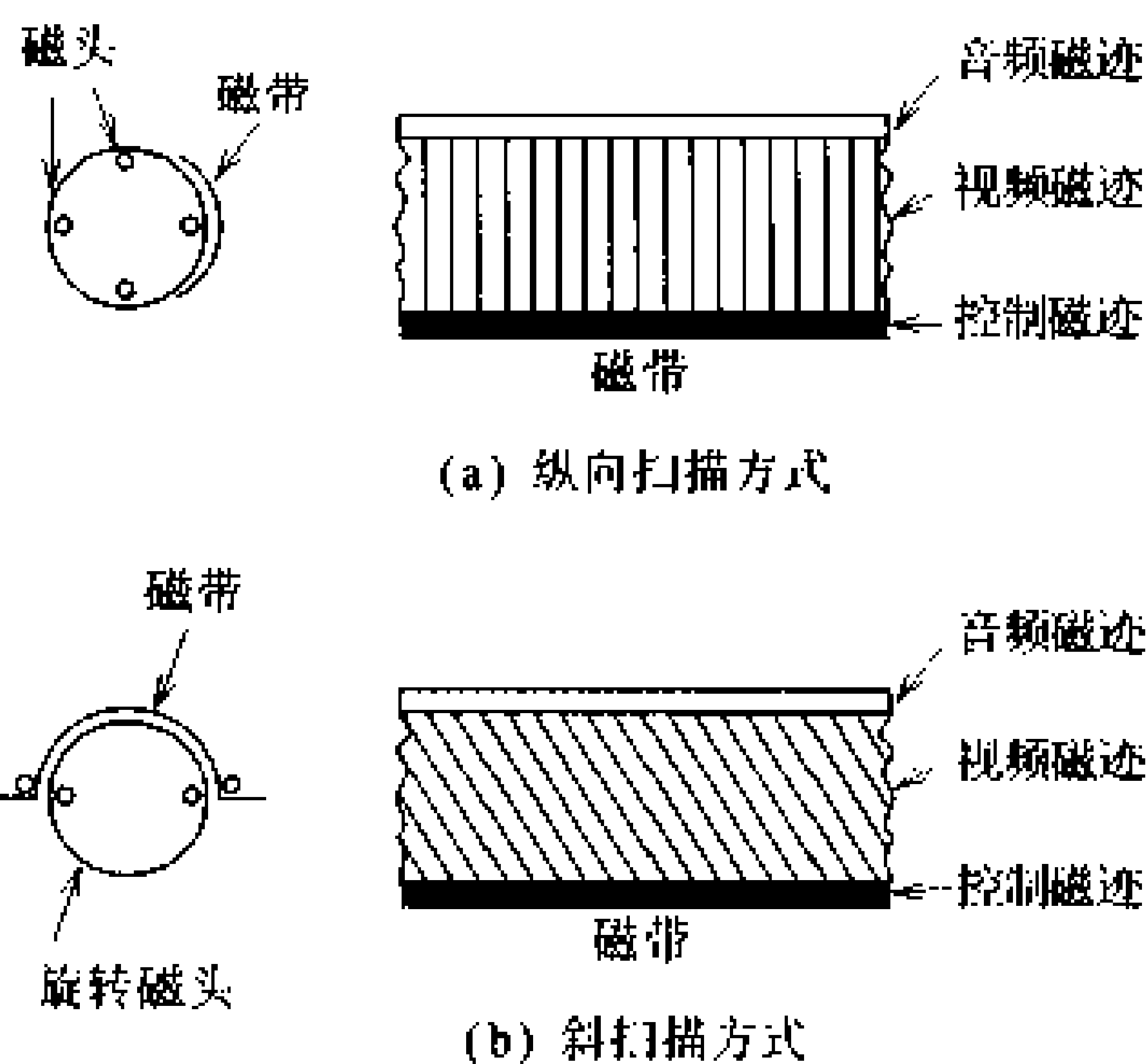


图 9.36 VTR 的记录方式

录像磁头是通过图像信号对磁带表面的磁化来记录图像的,其构造如图 9.37 所示。为了让录像磁头旋转,它被安装在滚筒上。

## ● VTR 的构成

VTR 的基本构成如图 9.38 所示。图像信号分离成亮度信号和色副载波信号,其中亮度信号经 FM 调制器被调制在比其频谱成分稍高的频率上而形成 FM 亮度信号,而色副载波信号通过频率变换器变换成比 FM 频谱低的频率,二者混合后送给磁头去记录。

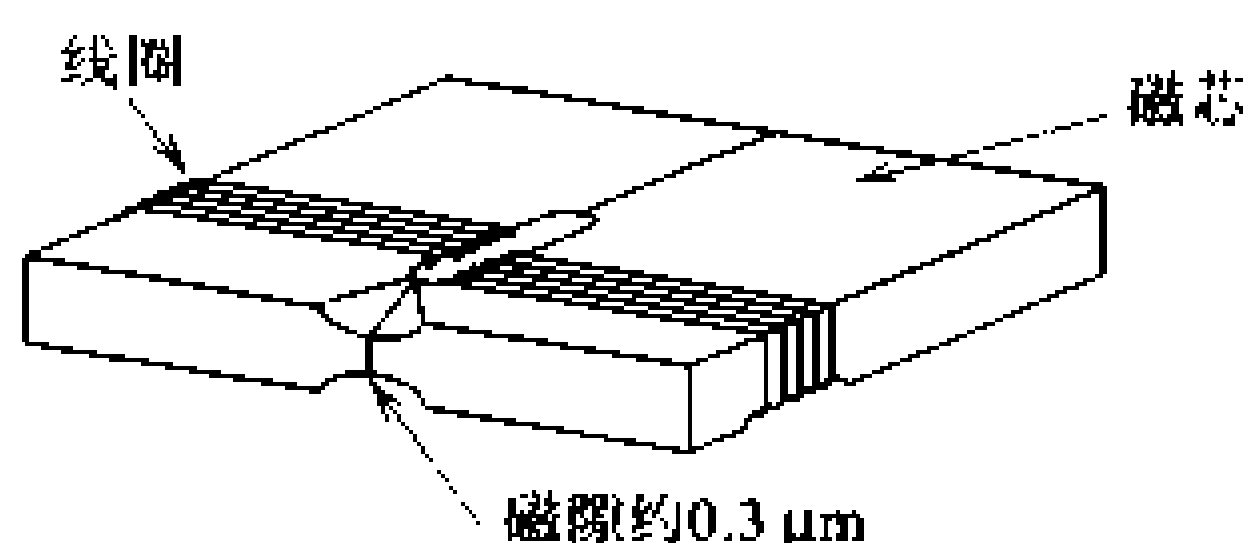


图 9.37 录像磁头

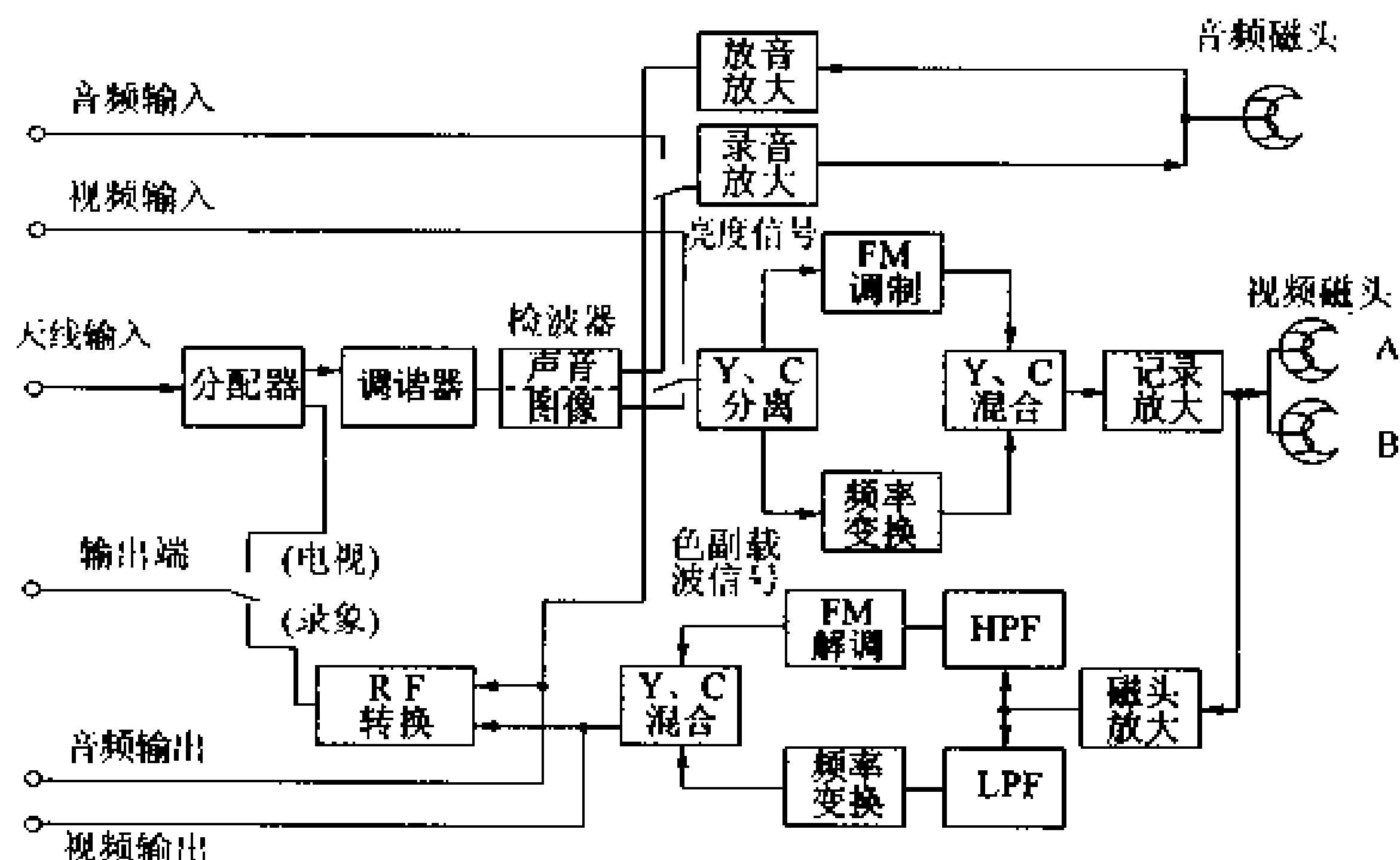


图 9.38 VTR 的构成

重放的原理是,磁头所放出的信号经放大后得到连续信号,该信号经 HPF 和 LPF 滤波器后分离成 FM 调制的亮度信号和低频色副载波信号,分别经 FM 解调和 3.58MHz 色副载波解调后得到 Y、C 信号,二者混合后得到图像信号。

声音信号是经过录音放大器或放音放大器由磁头记录成音频磁迹或重放出声音的。

# 11 传 真

## □ 要 点

传真是一种用通信线路传送文字、画面等静止图像的方法,传真机是从照片电传技术发展起来的小型轻便图像传输设备。

## □ 解 释 ● 传真的原理

图 9.39 示出传真机的基本构成。发送端用投射光对原稿进行扫描并读取反射光。如图 9.40 所示,当光投射到图像上时,其反射光被 CCD 或光电二极管之类的光电元件所接收,该反射光的强弱就被变换成电信号,该信号与同步信号一起送出。

接收端由解调器从收到的电信号解调出原图像信号,送给记录装置,重现出与发送端相同的图像。

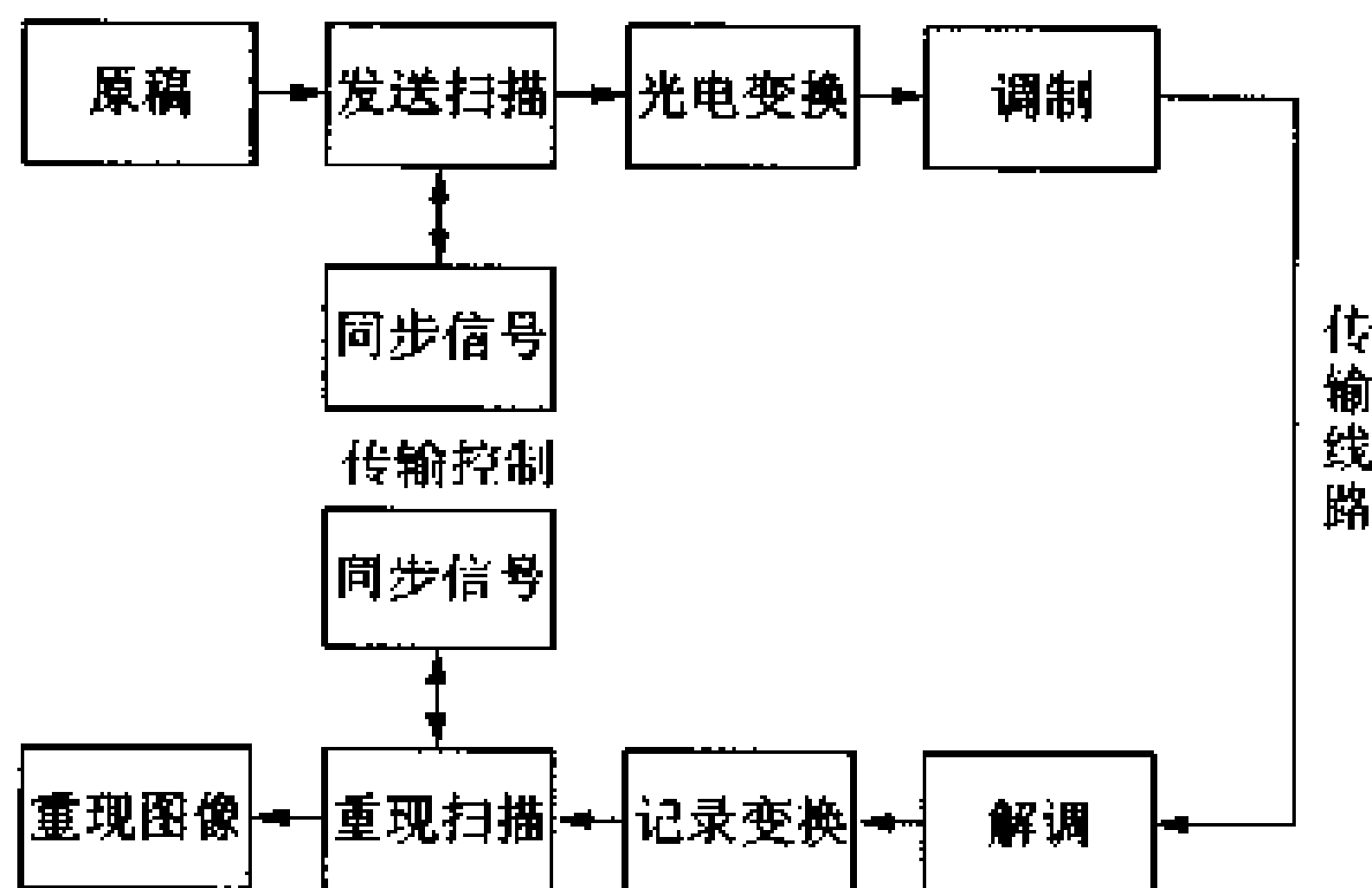


图 9.39 传真机的构成

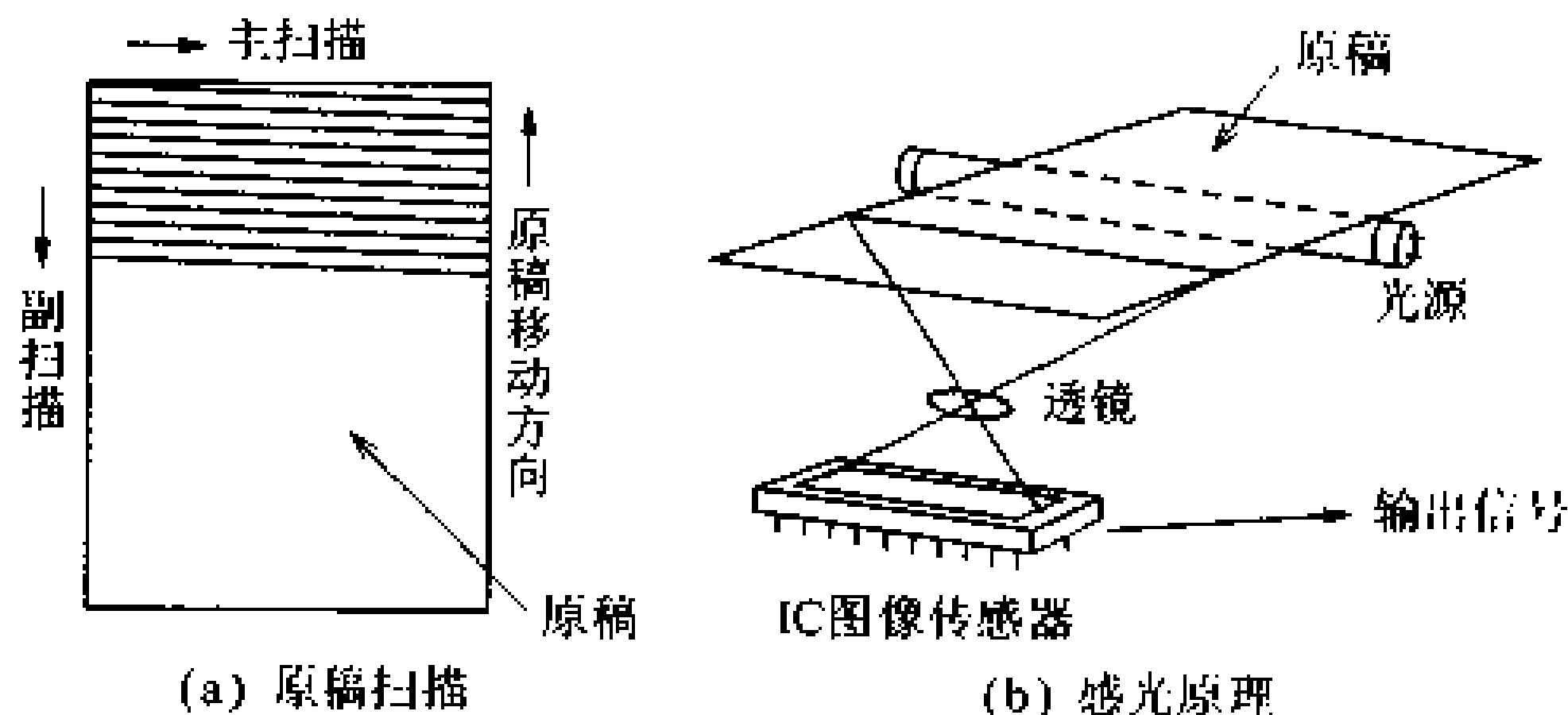


图 9.40 传真机的扫描

## ● 传真的机构与图像的发送与接收

电子扫描方式

图像信号电流

主扫描

副扫描

平面电子扫描方式是传真扫描方法的主流。图 9.41 示出电子扫描式传真的机构。发送端配置着一排与原稿扫描幅宽相对应的半导体感光元件,由该感光元件来获取电信号。原稿由走纸机构按一定速度送入,从原稿上反射出来的光到达感光元件后便得到了与原稿亮度相对应的图像信号电流。电子扫描方向称为主扫描,原稿移动方向称为副扫描。

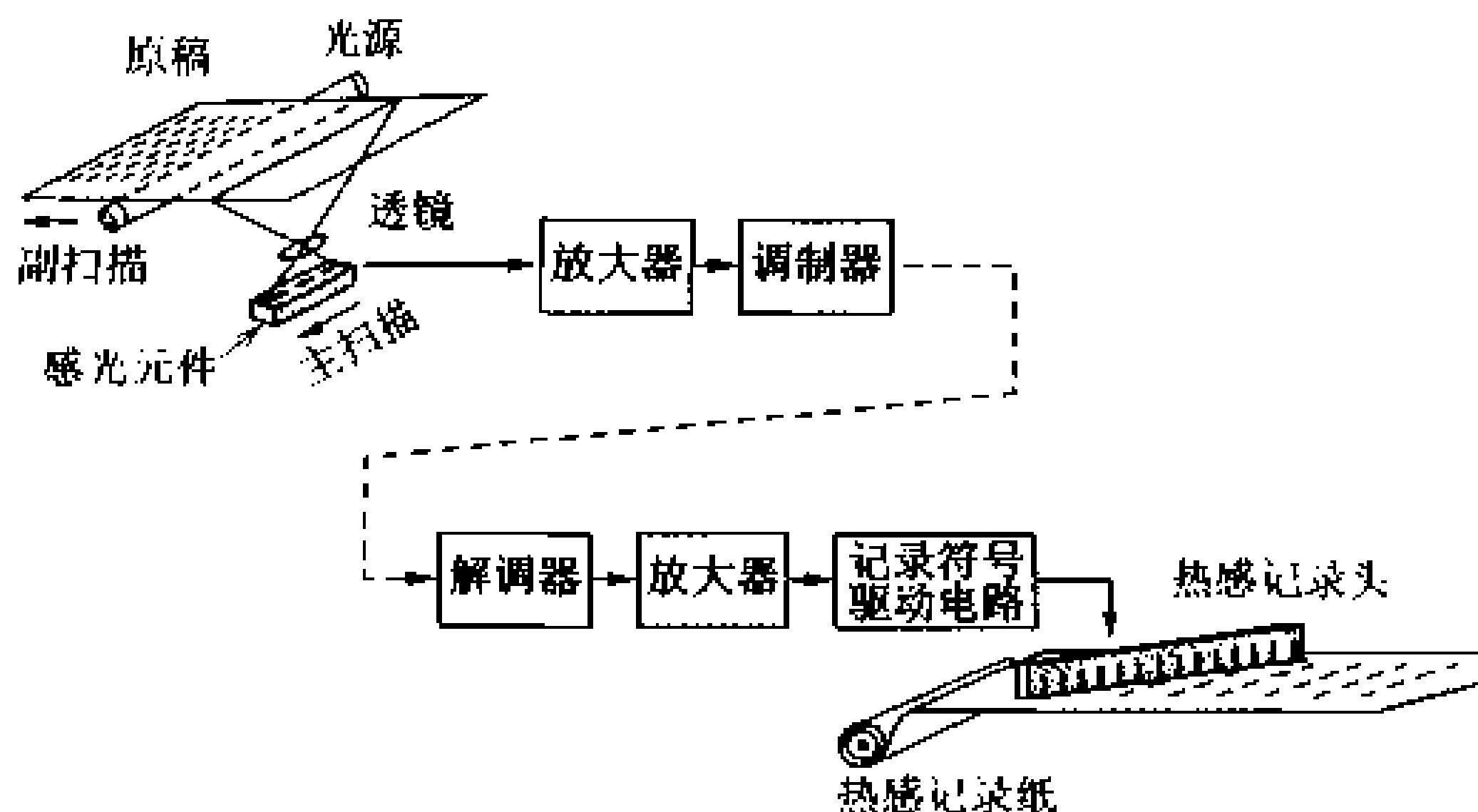


图 9.41 电子扫描式传真

热敏记录

图像信号电流经通信线路送到接收端。一般情况下,通信线路大都是利用电话线路,而电话线路不能直接传送传真图像信号,因而采用将其调制在 1900Hz 左右的载波上,以调幅信号方式来传送。接收端有静电记录和热敏记录两种记录方式。热敏记录方式中,走纸速度与发送端同步,走纸的同时,接收、解调、放大后的图像信号电流把重现图像记录在记录纸上。CCITT 按照国际通信的需要,对传真的规格进行了表 9.4 所示的分类。

现在,用户电话线路传真中,第 3 类(G3)是主流,它是将图像信号电流编码后高速传输的模拟传真方式。

表 9.4 传真的分类

分类	通信线路	传真信号方式	电传时间(一张 A4 纸)
第一类(G1)	用户电话线路	模拟传真	约 6 分
第二类(G2)	用户电话线路	模拟传真	约 3 分
第三类(G3)	用户电话线路	模拟传真	约 1 分
第四类(G4)	公共数据线路	数字传真	约 4 秒

# 12 音频放大器

□ 要 点

能不失真地将拾音器、CD唱机等输出的低频信号放大到所需大小的装置称为音频放大器。对于重放和放大音乐的装置,由于要求其输出更为接近原声,所以其电路是非常讲究的,这类放大器称为 Hi-Fi(高保真)放大器。立体声放大器因为要重现立体声,所以它是将两个相同的音频放大器组装在一起的声频设备。

□ 解 释

前置放大器  
主放大器

音频放大器由前置放大器和主放大器两部分组成,如图 9.42 所示。前置放大器的作用是对来自 CD 唱机或录音机的微弱声音信号进行低噪声放大和音量音质调整,并向主放大器提供输入信号。主放大器提供驱动扬声器所需功率,其末级要求输出相当大的功率,所以采用功率放大电路。音频放大器的频率特性如图 9.43 所示,在 20Hz~20kHz 范围内应保持平坦,按其电路结构,也有从直流(DC)到 20kHz 以上具有平坦特性的放大器。此外,电路必须线性良好、失真小。

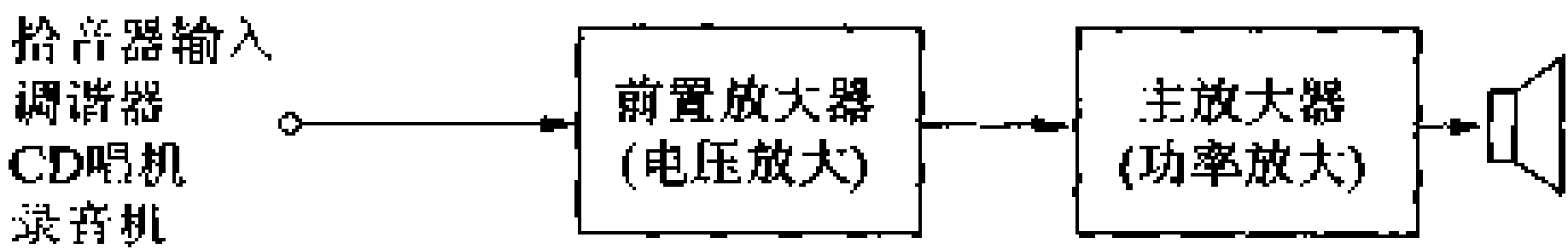


图 9.42 音频放大器的组成

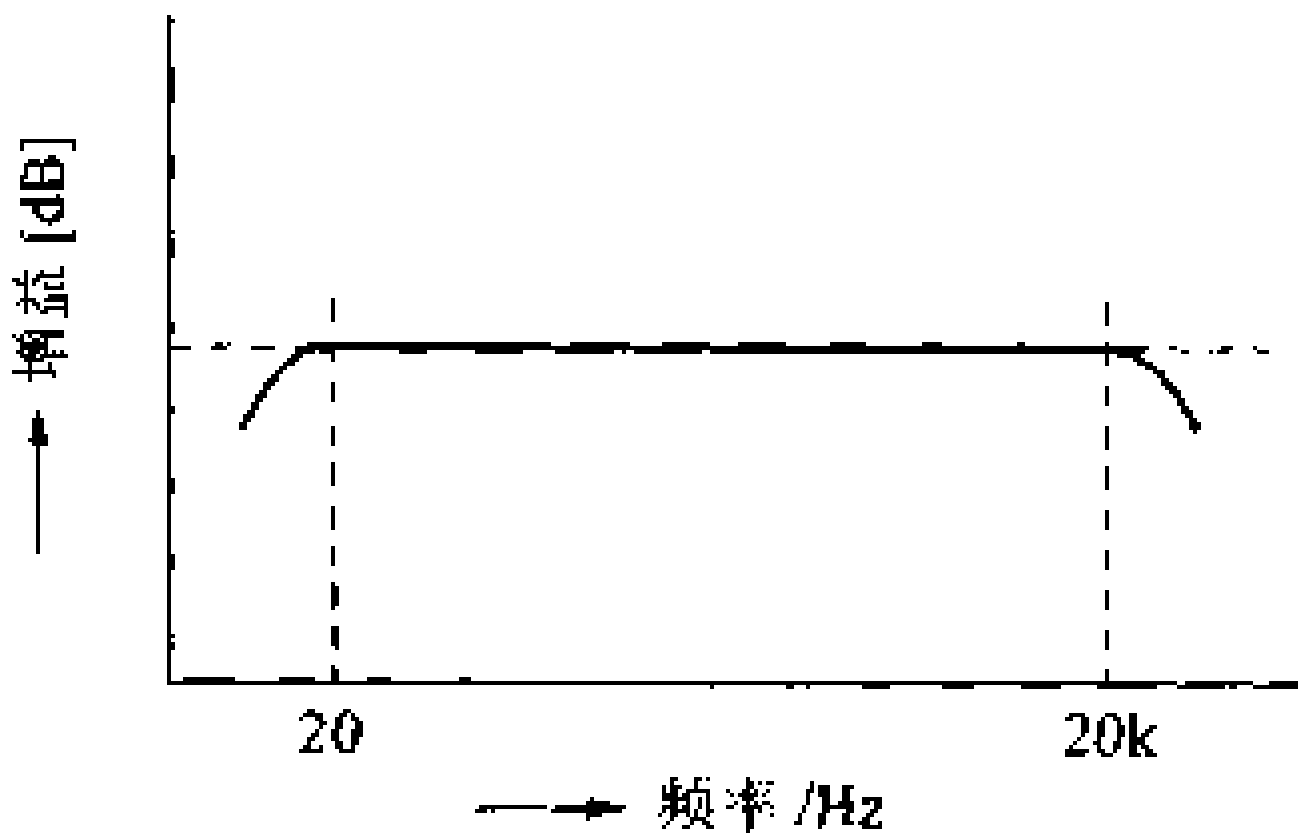


图 9.43 音频放大器的频率特性

● 前置放大器

前置放大器由音调控制电路、电压放大器、输入切换电路等构成。音调控制电路是调整音质的电路,有 CR 型、NF 型等。图 9.44 是前置放大器的构成。



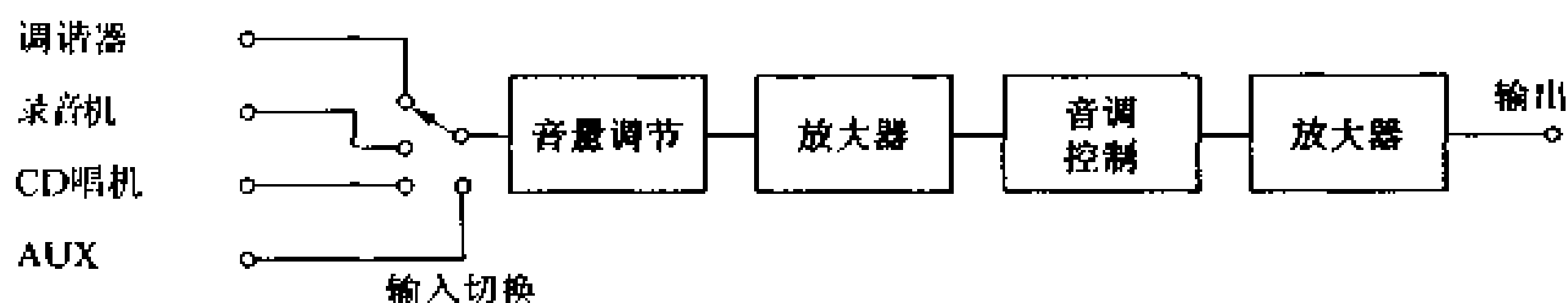


图 9.44 前置放大器的构成

### ● 主放大器

由于要得到大的输出,所以末级多采用 B 类推挽电路。当用晶体管或 FET 构成电路时,常采用图 9.45 的 SEPP(single-ended push pull)电路。SEPP 电路的两个晶体管分别只放大输入信号的半个周期,而在输出端合成为一个信号。由于两个晶体管对负载来说是并联的,而对电源来说是串联的,所以能够连接阻抗小的负载,因此,它能不用输出变压器而直接连接扬声器,成为 OTL(output transformer less)电路。

OTL 电路因其不用输出变压器,所以能够改善频率特性和失真率,也有利于小型化。

### SEPP 电路

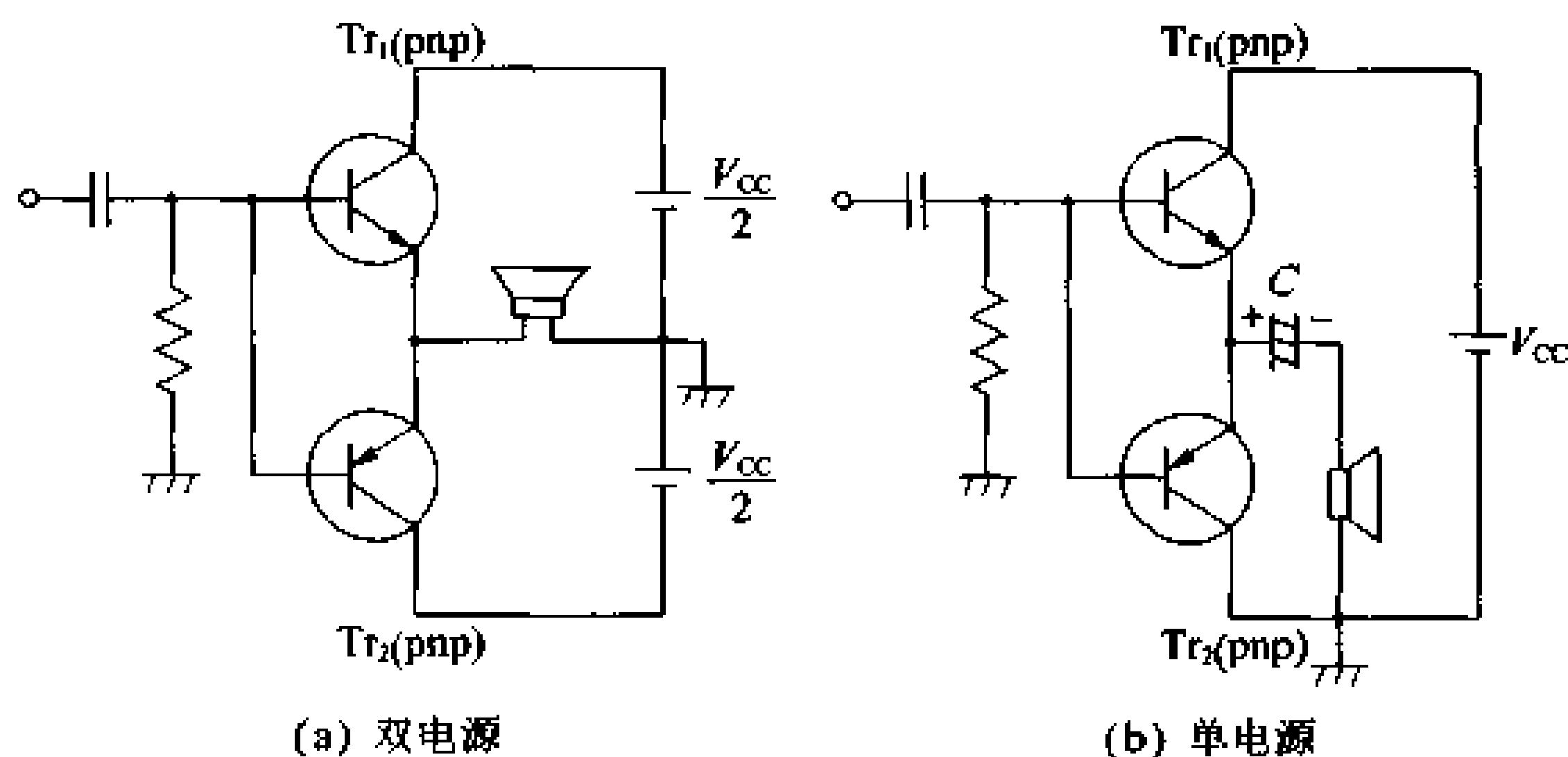


图 9.45 SEPP 电路

# 13 磁带录音机

□ 要 点

磁带录音机是以剩磁形式将声音信号记录在磁带上并由所记录磁通的变化来重放声音信号的装置、录音、放音、抹音、复录都很方便,并且具有频带宽、音质好的特点。

记录电视图像信号的 VTR、计算机的磁带存储设备、测量记录装置等的基本原理与磁带录音机相同,只是它们应用在不同的方面。

□ 解 释

剩磁

● 磁记录及重放原理

当用电磁铁吸引铁片后再把铁片从电磁铁上拿开的时候,铁片上会留下较弱的磁性,这种磁性称为剩磁,磁带录音机就是应用这一原理做成的。如图 9.46 所示,给相当于电磁铁的磁头加上电信号,让相当于铁片的磁带靠在磁头上行走,磁带上的磁性层就被磁头上的磁力线磁化而记录下信号。

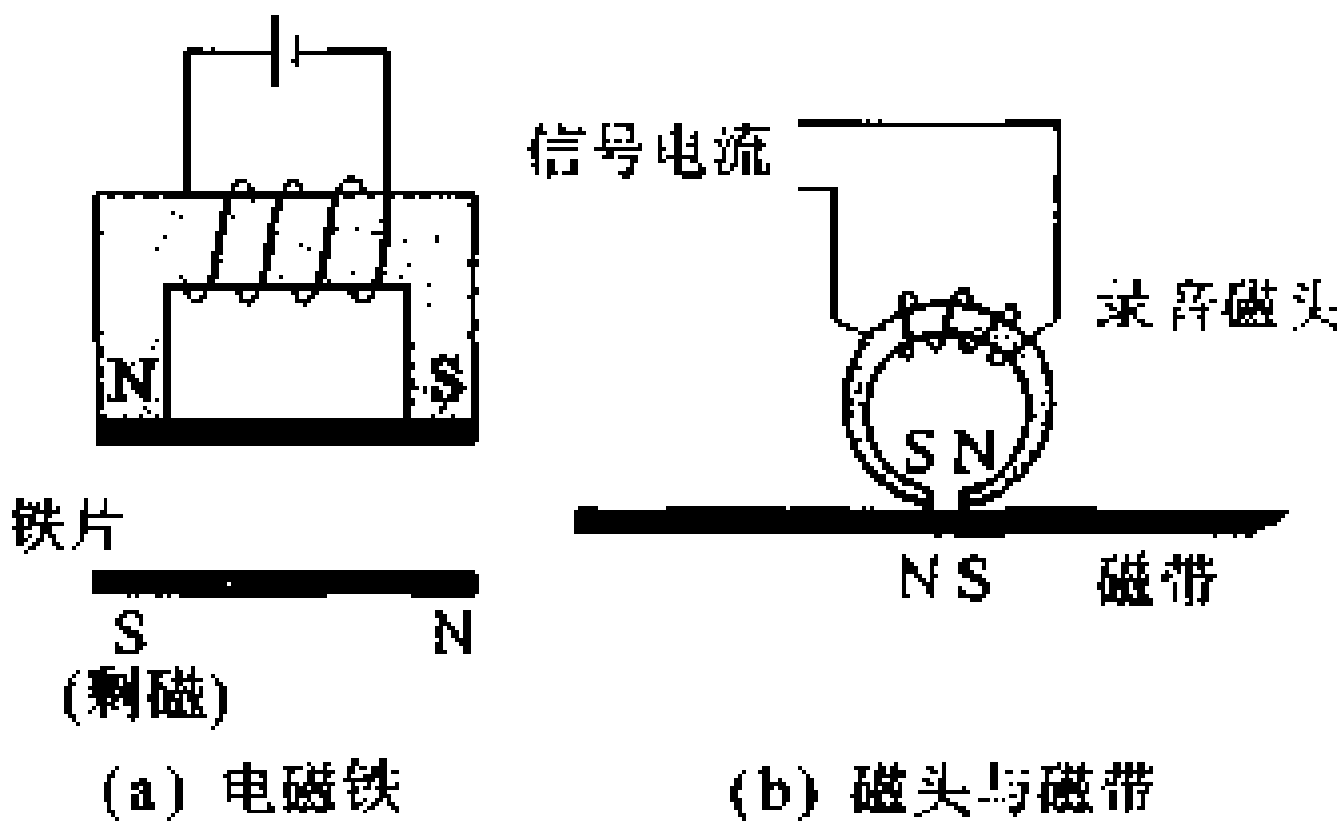


图 9.46 磁记录原理

磁带录音机的重放原理是,在线圈中放一个磁铁,磁铁一动,线圈中就因磁感应作用产生电压。仍如图 9.46 所示,让已录上音的磁带紧贴着磁头以与录音时相同的速度行走,磁头线圈中就产生与磁化强弱相对应的电压。

● 磁 头

磁头是在电信号与磁信号之间起着电磁转换作用的部件,有录音磁头、放音磁头和抹音磁头。此外,盒式磁带录音机中也有兼用于录音和重放的磁头。图 9.47 示出磁头的构造。线圈绕在铁镍合金迭层铁芯上,铁芯端的结合部有 10 微米大小的磁隙。

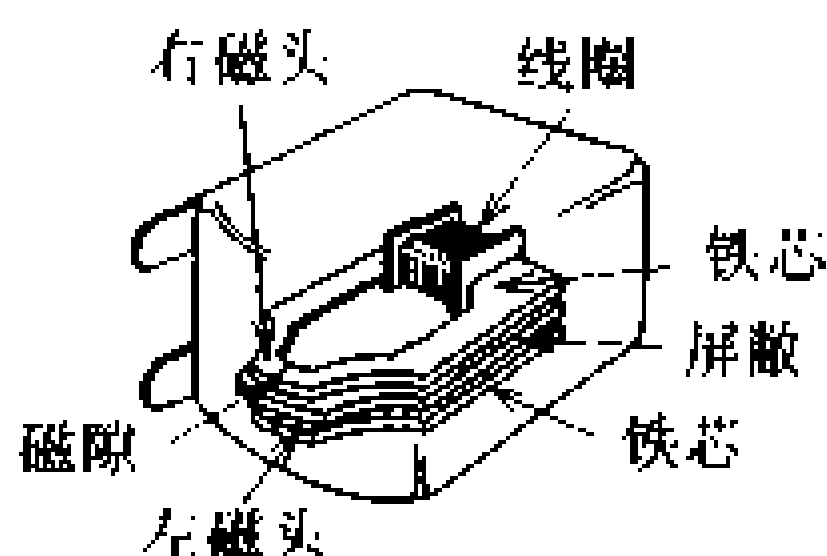


图 9.47 磁头的构造

### ● 磁带录音机的构成

磁带录音机的构成示于图 9.48, 它由保证磁带平稳行走的送带机构、录音磁头、放音磁头、抹音磁头、以及放大录音信号或重放信号的录音放大器和放音放大器、高频发生器等电子电路构成。

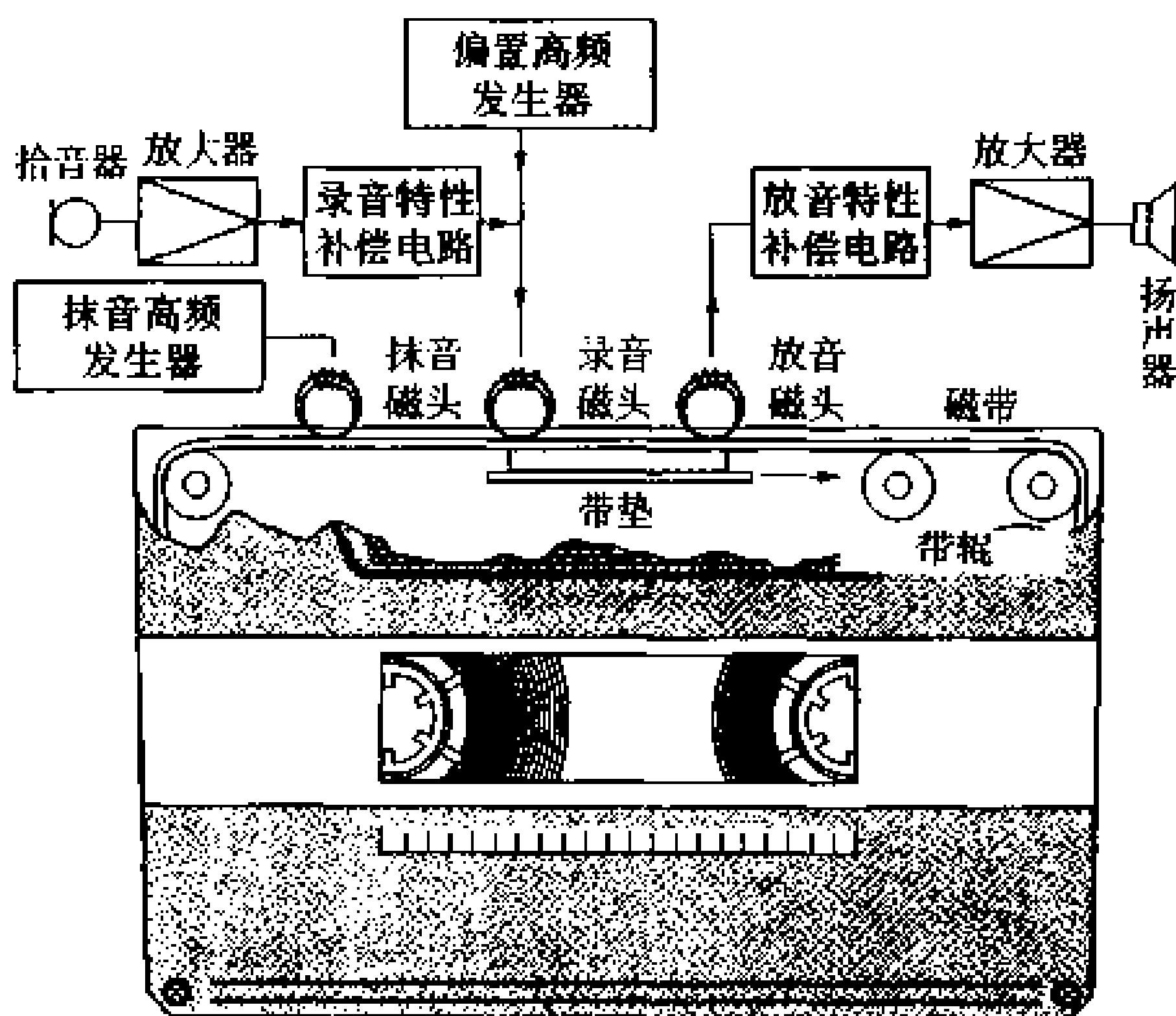


图 9.48 磁带录音机的构成图

### ● 磁化曲线与偏置记录方式

磁带的磁化曲线如图 9.49(a) 所示。按照这一特性曲线, 当给磁头输入录音信号时, 录下的信号将会因磁化曲线的非线性而失真, 如图 9.49(b) 所示。为了避免这种失真, 可以给录音信号加上直流偏置或交流偏置。前者称为直流偏置记录方式, 后者称为交流偏置记录方式。从失真等方面看, 直流偏置方式较差, 所以并未被采用。

直流偏置记录  
方式  
交流偏置记录  
方式

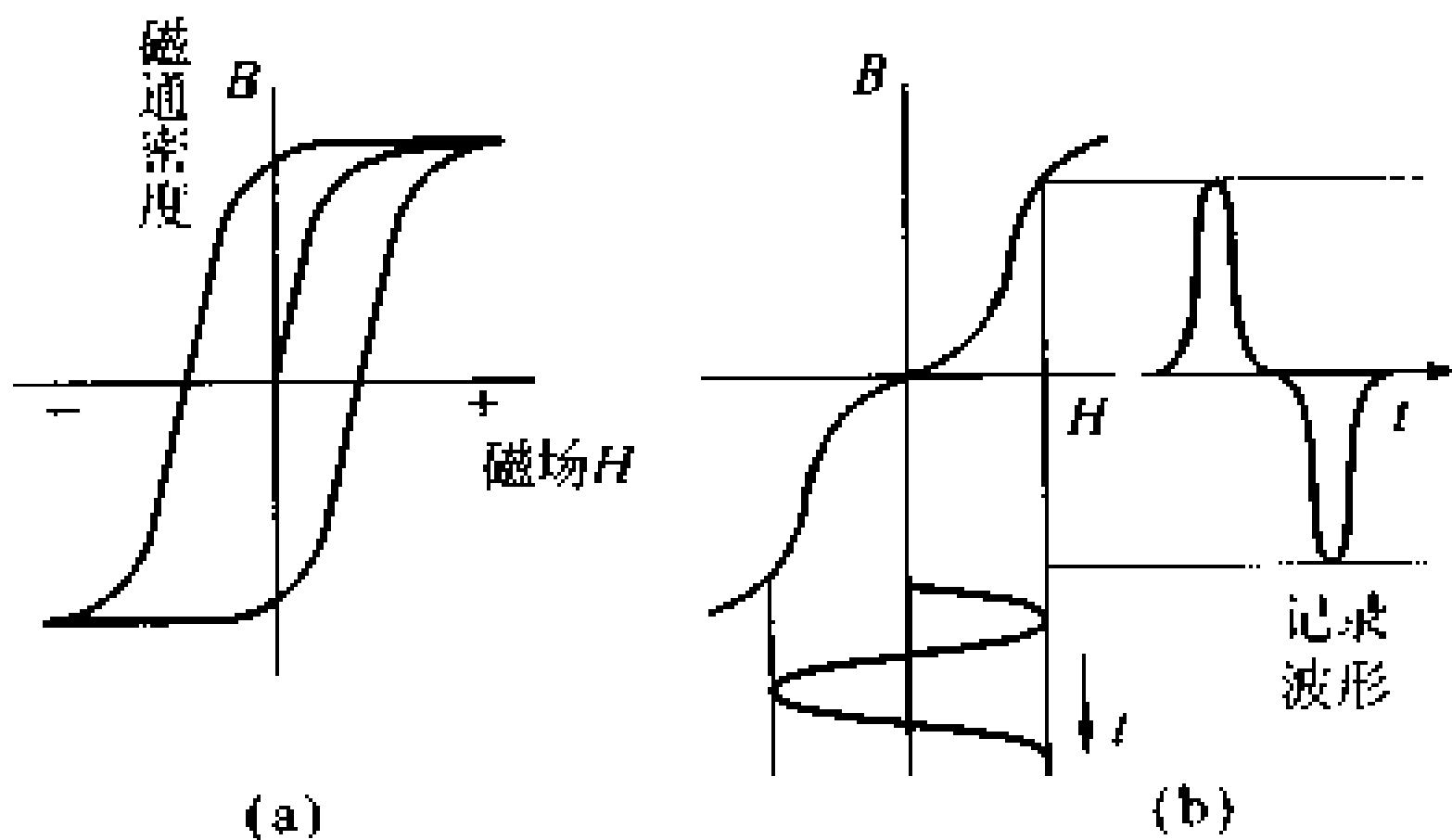


图 9.49 磁化曲线及信号波形

交流偏置记录方式是将  $30\text{kHz}\sim 200\text{kHz}$  的高频电流与录音电流迭加起来进行录音的。如图 9.50 所示,高频磁场所产生的剩磁消失了,只有与信号磁场相对应的剩磁被记录了下来。这种记录方式具有失真小、线性范围宽、噪声小等优点,所以也用于 VTR 的声音信号记录系统。

● 抹 音

抹去已录信号的方法如图 9.51 所示。给抹音磁头加上高频电流,磁带从磁头下走过将使磁滞迴线变小,从而抹去剩磁。

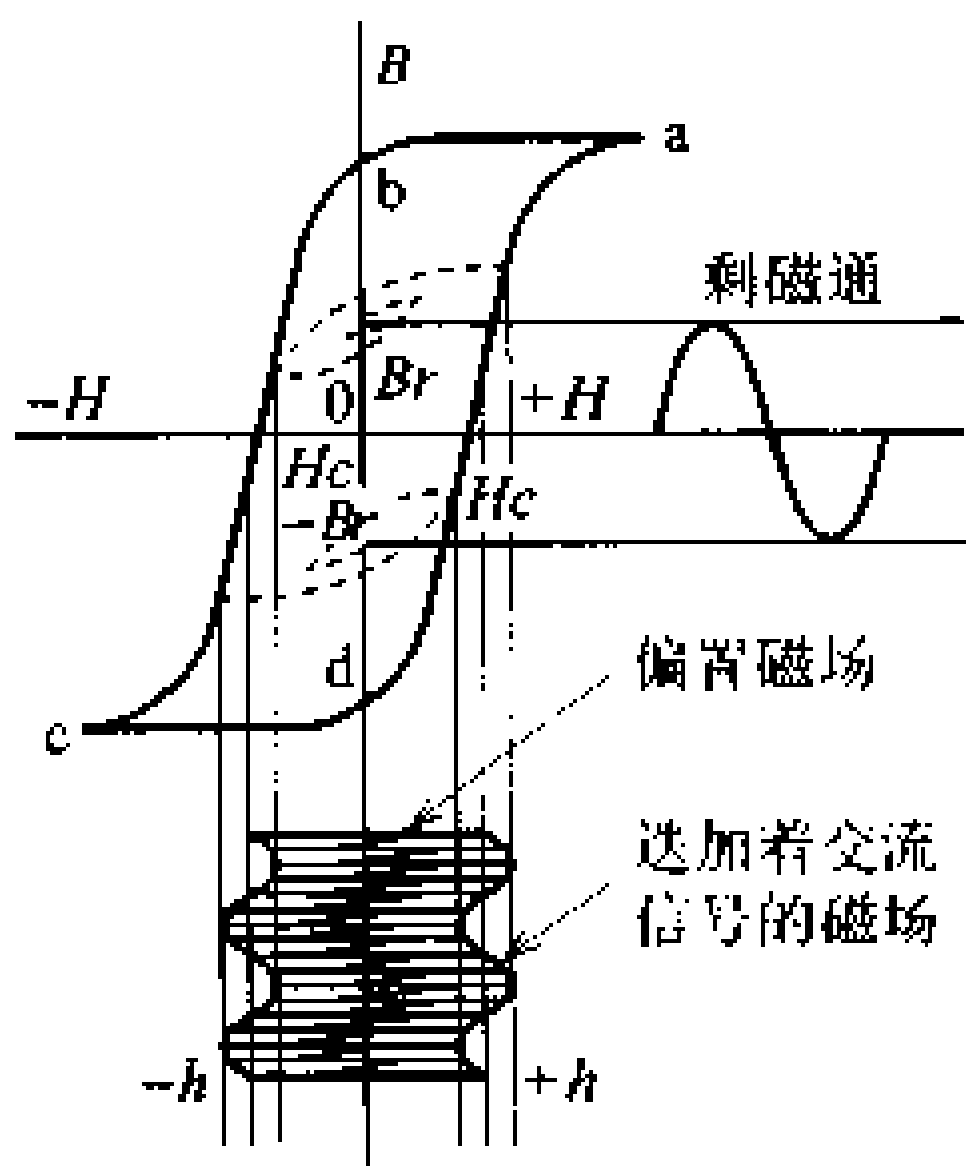


图 9.50 交流偏置记录方式

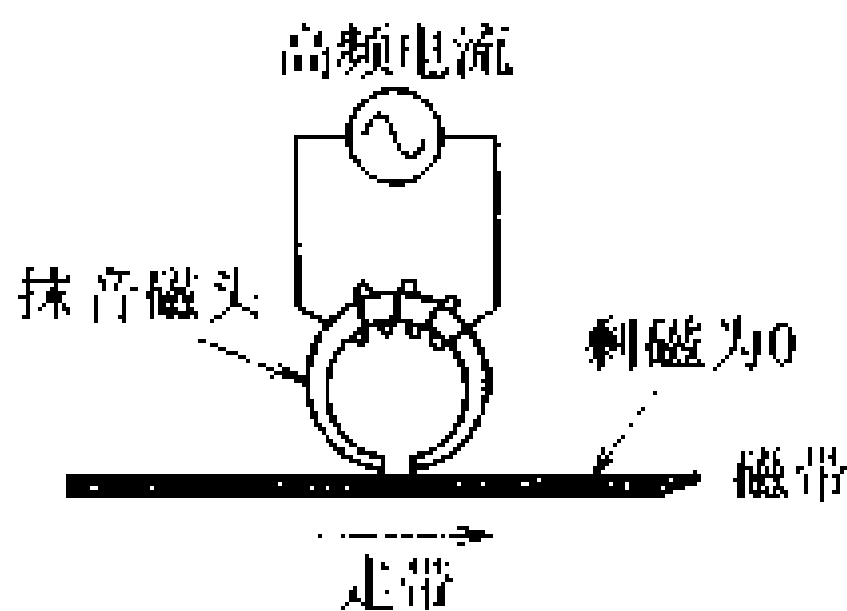


图 9.51 抹 音

## 14 数字记录原理与数字音频

### □ 要 点

数字技术的实用化及半导体技术与 LSI 技术的发展促进了数字信号处理电路和存储器电路的小型化和廉价化,其结果导致了数字技术在音频领域的广泛应用,开发出了压缩光盘(CD)唱机、数字音频磁带录音机(DAT)以及数字方式记录图像和声音的激光盘(LD)等数字音频产品。

### □ 解 释 ● 数字记录及重放的原理

音乐之类的声音被拾音器所变换成的电信号是随时间而变化的模拟信号。数字记录是把这种模拟信号经过编码后变换成脉冲序列形式的数字信号再进行的记录。重放就是把记录下的数字信号变换成模拟信号。图 9.52 示出数字音频系统的概要。

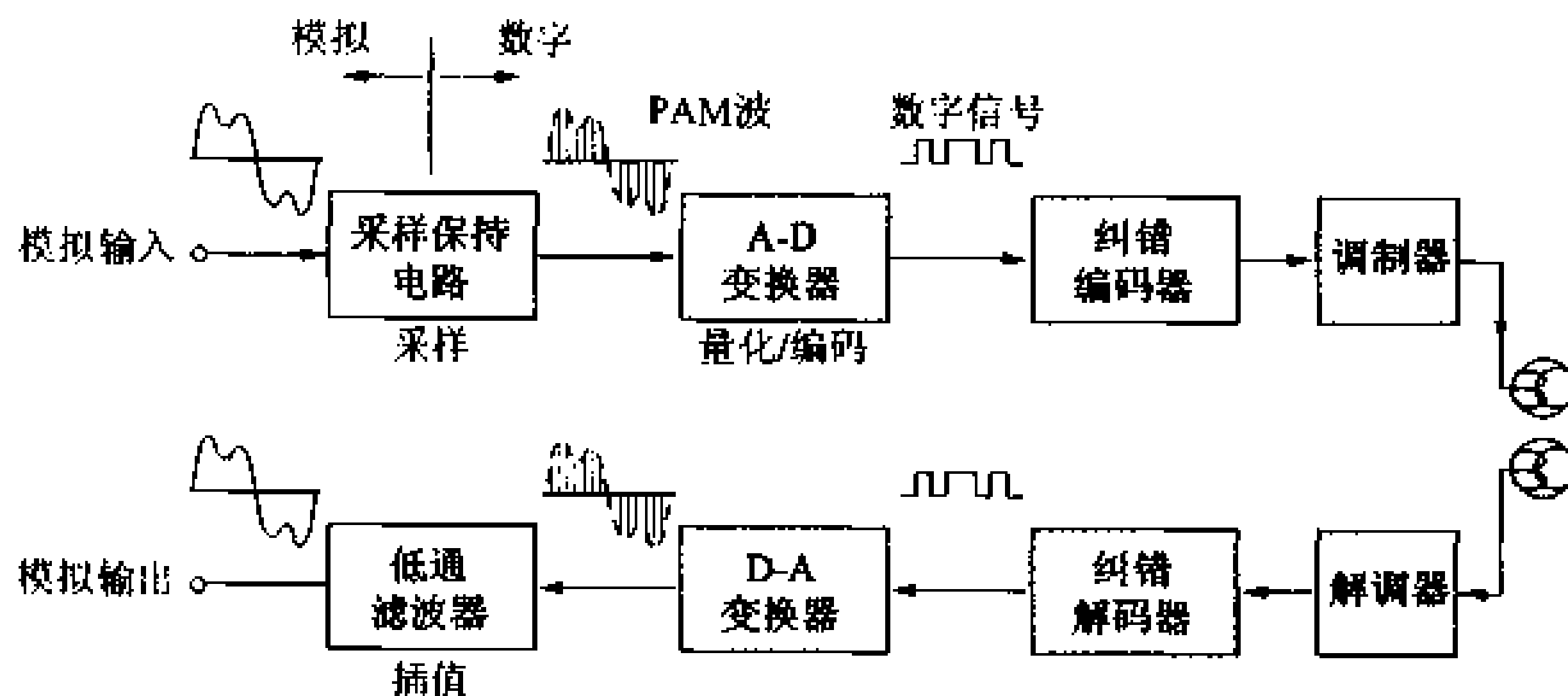


图 9.52 数字音频系统概要

如图所示,输入模拟信号经采样电路后变成脉冲序列,然后由 A-D 变换器对脉冲一个一个地进行量化和编码,变换成有限个 2 进制数,得到数字信号。

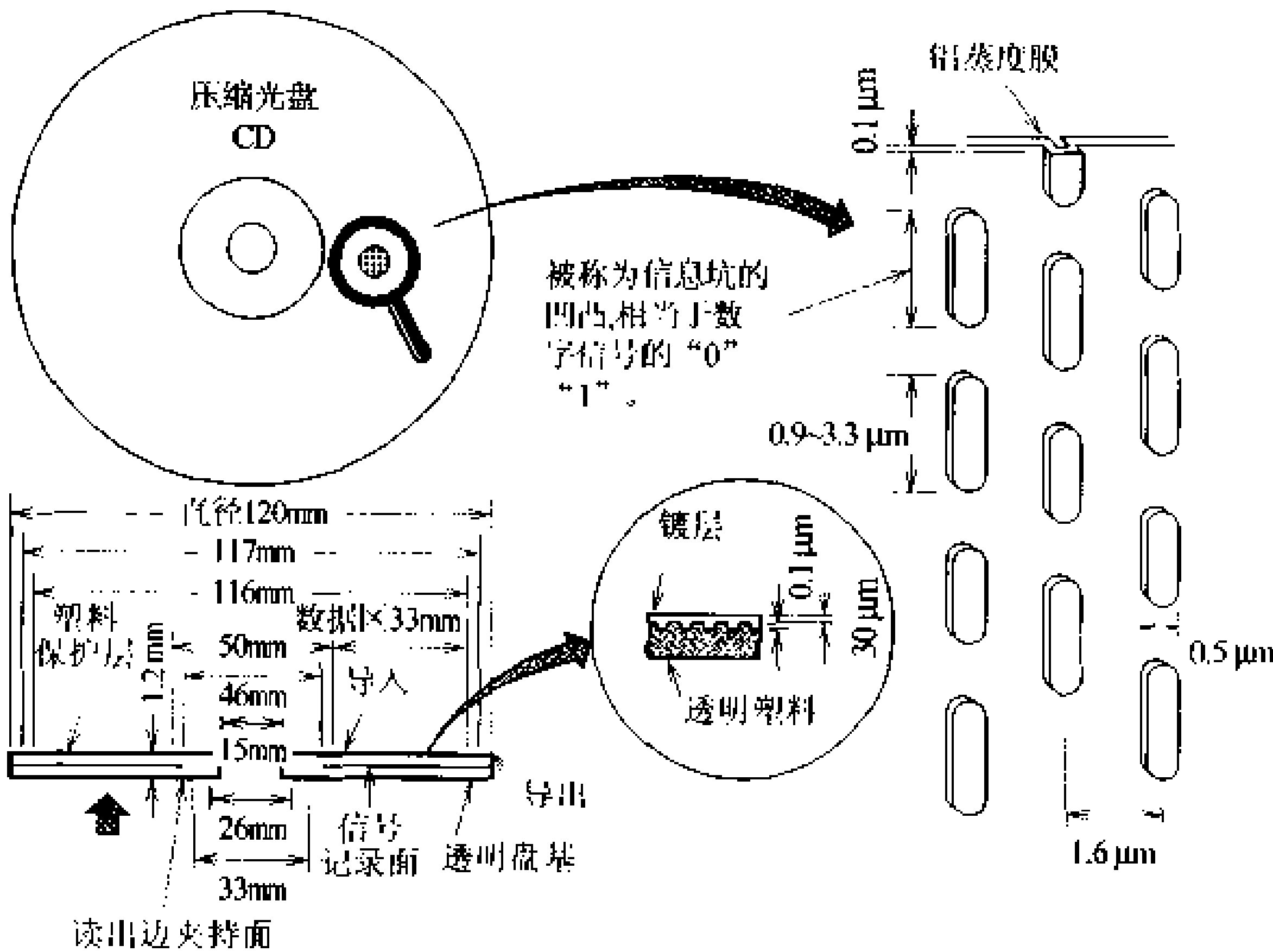
重放时,取出数字信号,经 D-A 变换器和孔径校正电路变换成脉冲,再经低通滤波器插补回采样中丢失部分的波形,得到重放的模拟信号。

### ● CD 唱机

数字音频系统中最普及的是 CD 系统。如图 9.53 所示,CD 是一种直径 120mm、厚度 1.2mm 的非接触激光读取方式的记录

EF 调制

媒体,数字化信息以称之为信息坑的深  $0.1\mu\text{m}$ 、宽  $0.5\mu\text{m}$ 、长  $0.9\mu\text{m}\sim 3.3\mu\text{m}$  的凹凸槽的形式记录在铝蒸镀膜上。CD 之类的数字记录方式不能记录和解调直流成分,例如,当 CD 的光道上持续为没有信息坑的状态时,就无法跟踪用光反射来取出信号的光检测器。为此,采用了一种 EF(8-14)调制(EFM),它是一种按一定的间隔让“0”和“1”反转而去掉直流的变换方式。



规格	内容
采样频率	44.1kHz
量化位数	16 bit 线性量化
调制方式	EFM8bit →14bit变换
误码校正	交叉交织及里德·索罗门码

图 9.53 CD 的构造和规格

● 数据的读取与重放

光检测器

如图 9.54 所示,记录在 CD 上的数字信息的读取是由半导体激光器、光电二极管等所构成的光检测器来进行的。当半导体激光器发出的激光束碰到 CD 上的信息坑时,反射光随信息坑的出现而变化,并将这一变化量变换成电信号便恢复了数字信号。恢

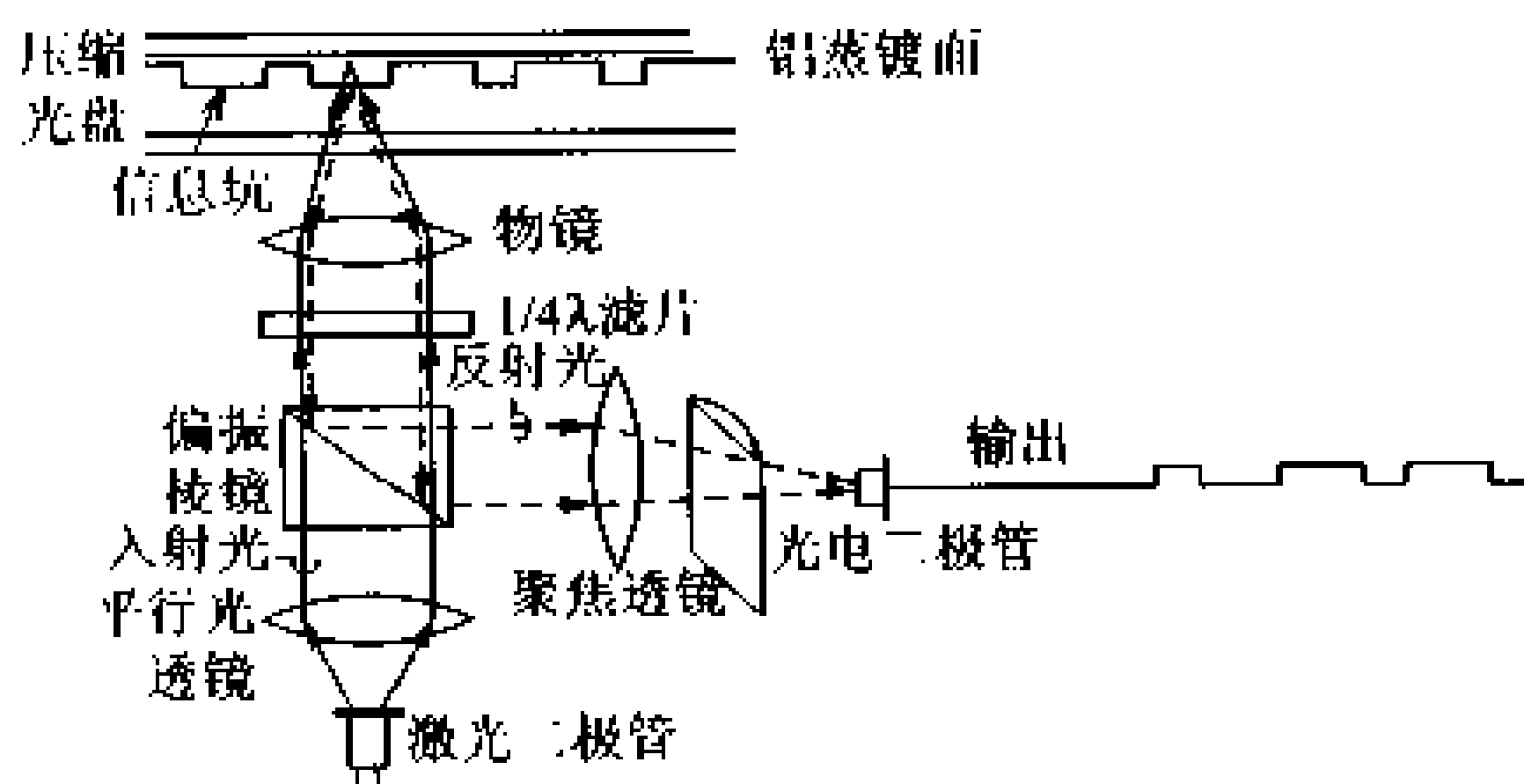


图 9.54 CD 数据的读取

复出的信号是 14 比特模型的信号,因而还要再把它解调为 8 比特的数字信号,再经过 D/A 变换,得到模拟信号。

### ● CD 唱机的构成

CD 唱机的基本构成和规格示于图 9.55。光检测器读出的数字信息经 EFM 方式解调、纠错解码信号处理及 D-A 变换,得到模拟信号。然后再通过线路放大器放大,重现原录制的音乐信号。

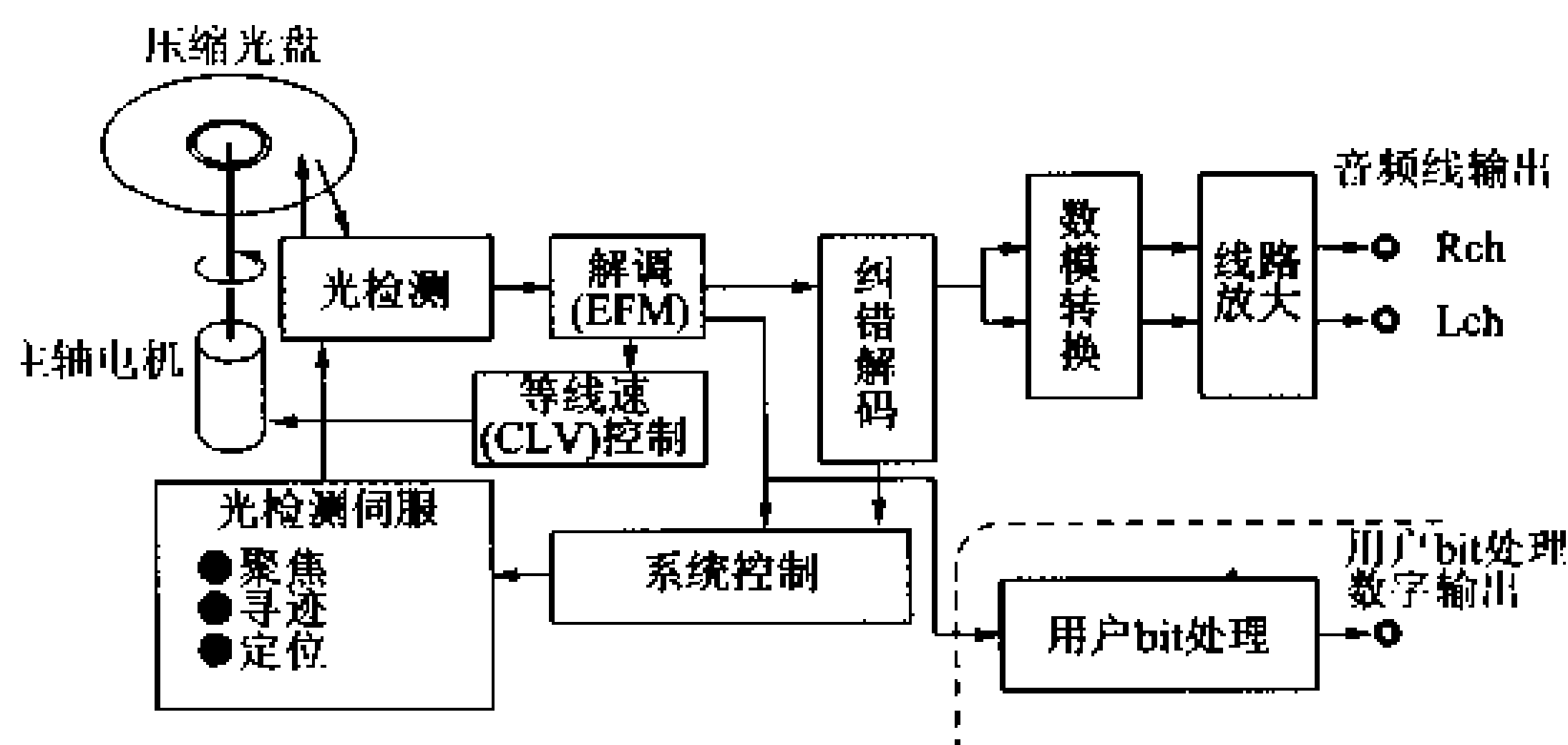


图 9.55 CD 唱机的构成和规格

CD 唱机系统的优点在于检测头不接触 CD,因而不会磨损老化,也易于随机访问。此外,CD 唱机没有录音功能,所以其构造简单。

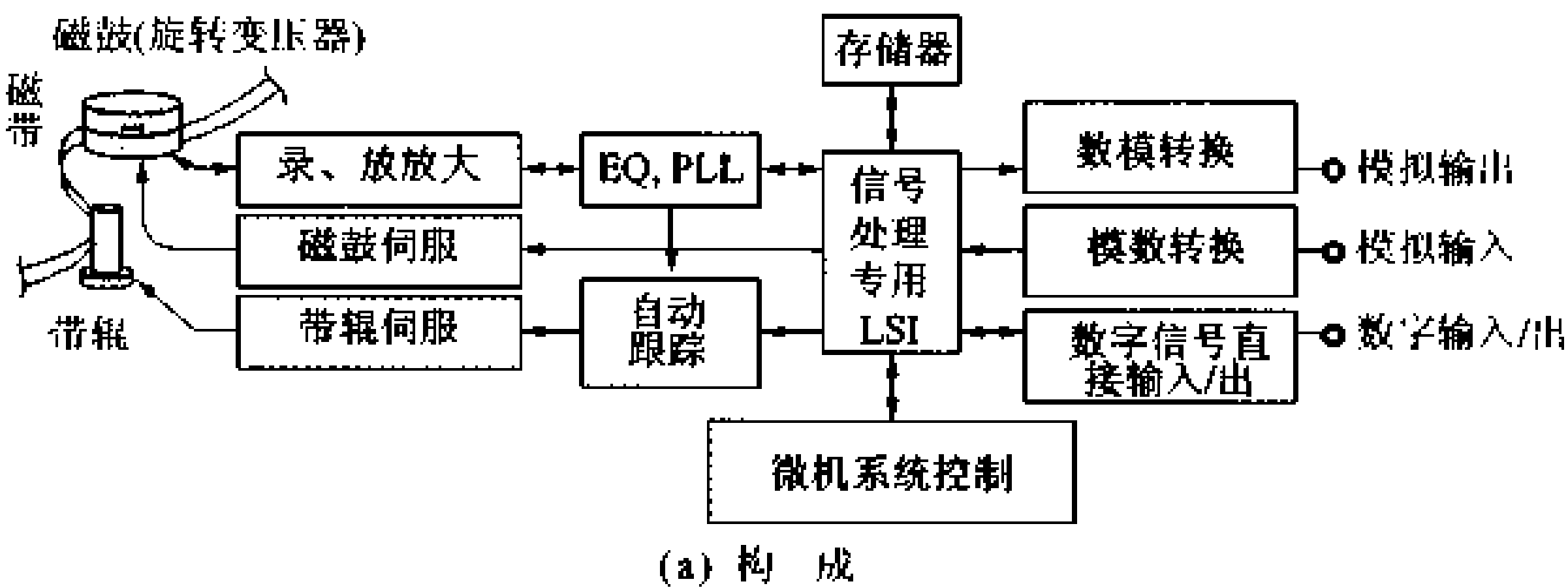
### ● DAT

DAT(digital audio tape recorder)与 CD 一样,是能够将音乐之类的模拟信号变换为数字信号来进行录音和重放的数字音频设

备。为了便于录音,记录媒体采用了装在专用盒子中的磁带。  
DAT 有固定磁头式的 S-DAT 和旋转磁头式的 R-DAT 两种形式。这里介绍 R-DAT。

● DAT 的构成

DAT 的磁记录部分由与声频盒式磁带相近的 3.81mm 磁带和直径 30mm 的旋转磁头构成。DAT 的基本构成和规格示于图 9.56。标准规格为采样频率 48kHz、量化比特数 16 比特的标准模式,此外还备有其它模式可供切换选择。



	录放型		重放专用型
	标准	任选3	正常跟踪
采样频率[kHz]	48k	32k	44.1
量化位数	16	12	16
通道数	2	4	2
磁带速度[mm/s]	8.15	8.15	8.15
磁鼓转数[rpm]	2000	2000	2000
用途	标准记录	长时间用	重放专用

(b) 规格  
图 9.56 DAT 的构造和规格

其工作原理是,首先将模拟信号经采样、量化,使之变为数字信号。其次用纠错编码电路加上误差校正码、进行 DAT 的调制方式 8-10 变换、以图 9.57 所示格式用旋转磁头记录到磁带上。为了能判断记录到磁带上的“0”和“1”的情形,所以不要加录音偏置。  
重放原理是先把来自磁头的记录信息恢复成数字信号,然后以与 CD 相同的原理重现模拟信号。



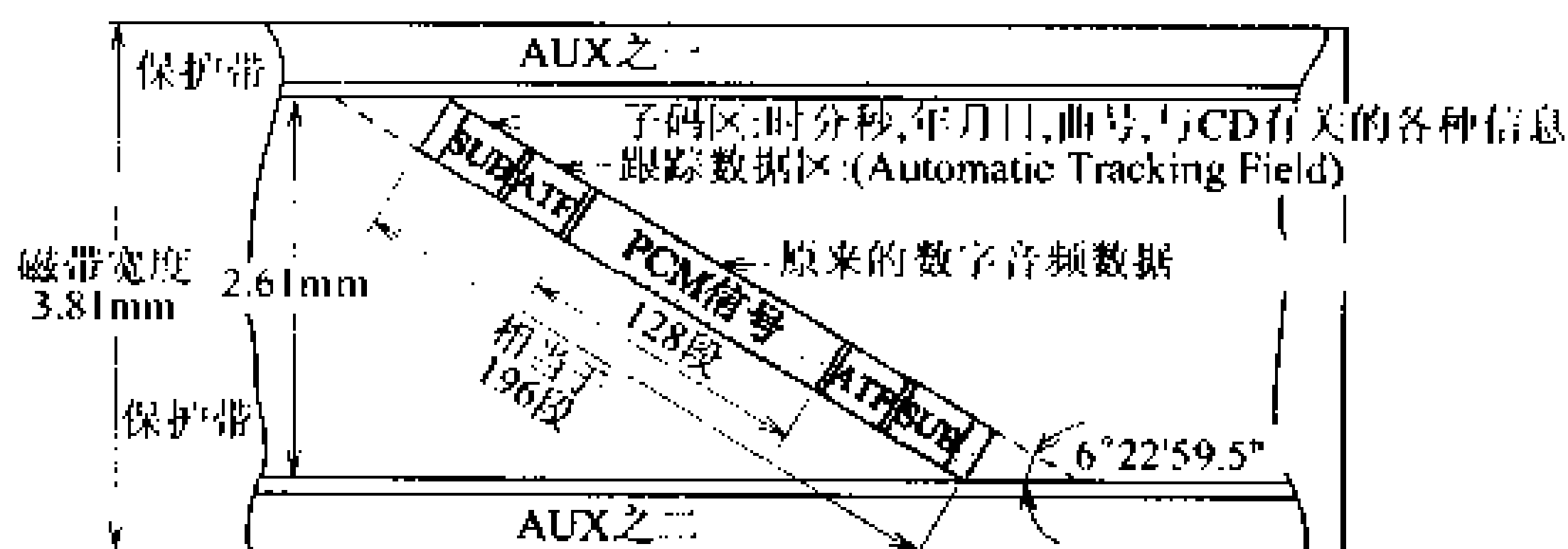


图 9.57 DAT 的格式

## □ 相关知识 ● 数字音频机

数字音频机是指利用家用 VTR 进行数字录音的数字音频处理器等设备。

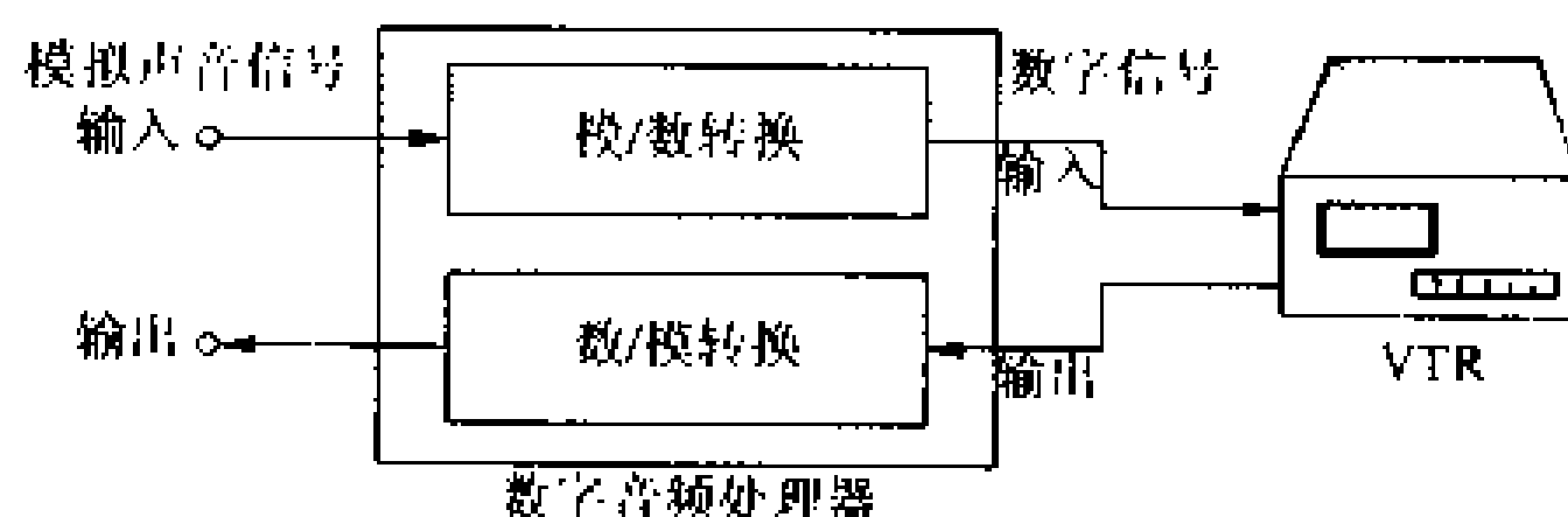


图 9.58 数字音频处理器

## ● EFM(eight to fourteen modulation)变换

EFM 是 CD 的调制方式。以数字信号的 8 比特为单位变换成 14 比特的模型。表 9.5 中示出其变换的例子。

表 9.5 EFM 变换举例

	数据	通道位		数据	通道位
0	00000000	01001000100000	64	01000000	01001000100100
1	00000001	10000100000000	65	01000001	10000100100100
2	00000010	10010000100000	66	01000010	10010000100100
3	00000011	10001000100000	67	01000011	10001000100100
4	00000100	01000100000000	68	01000100	01000100100100
5	00000101	00000100010000	69	01000101	00000000100100

# 15 计算机与多媒体

## □ 要 点

随着以计算机为首的数字技术和半导体技术的发展,不仅字符信息可以作为数字信号,语音、音乐、静止图像、运动图像等各种信息都可以作为数字信号来处理。其结果,信息就可以作为数字信号来存储、记录、重现、传送和加工。将这些信息统一起来考虑的技术就是多媒体技术。

## □ 解 释

### ● 什么是多媒体

多媒体就是数字化信息媒体与计算机相结合,并与通信和广播(CATV)媒体相融合,以更高的密度按需要提取高品位信息,从实际应用的高度进行交互式(双向)信息传输和处理(参看图 9.59)。

交互式

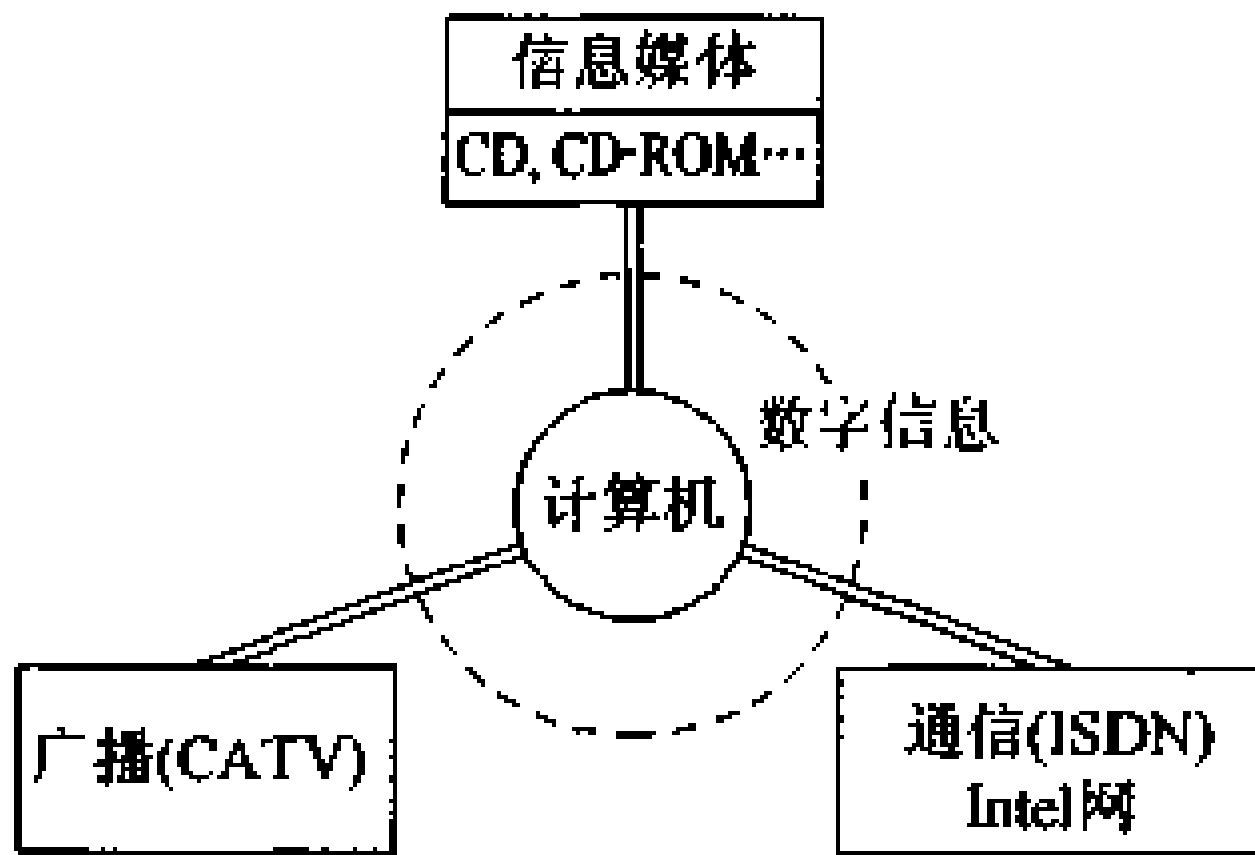


图 9.59 多媒体的概念

图 9.60 是连接着 CD-ROM、立体声 PCM 声源等装置的多媒体个人计算机,它的用处很多。例如,可以一面查阅电子百科全书,一面通过电子国语辞典了解词意,并送入文字处理器形成文件。还可以用计算机作曲和演奏等。

### ● 多媒体实用化的条件

将信息的存储、记录、重现、传送、加工、检索等用数字信号来进行处理是人们的需要。为此,下列各项全都应该廉价化。

- ① 快速高性能的 MPU(微处理器);
- ② 大容量高速存储设备;
- ③ 数据压缩技术;
- ④ 高画质输入输出设备;

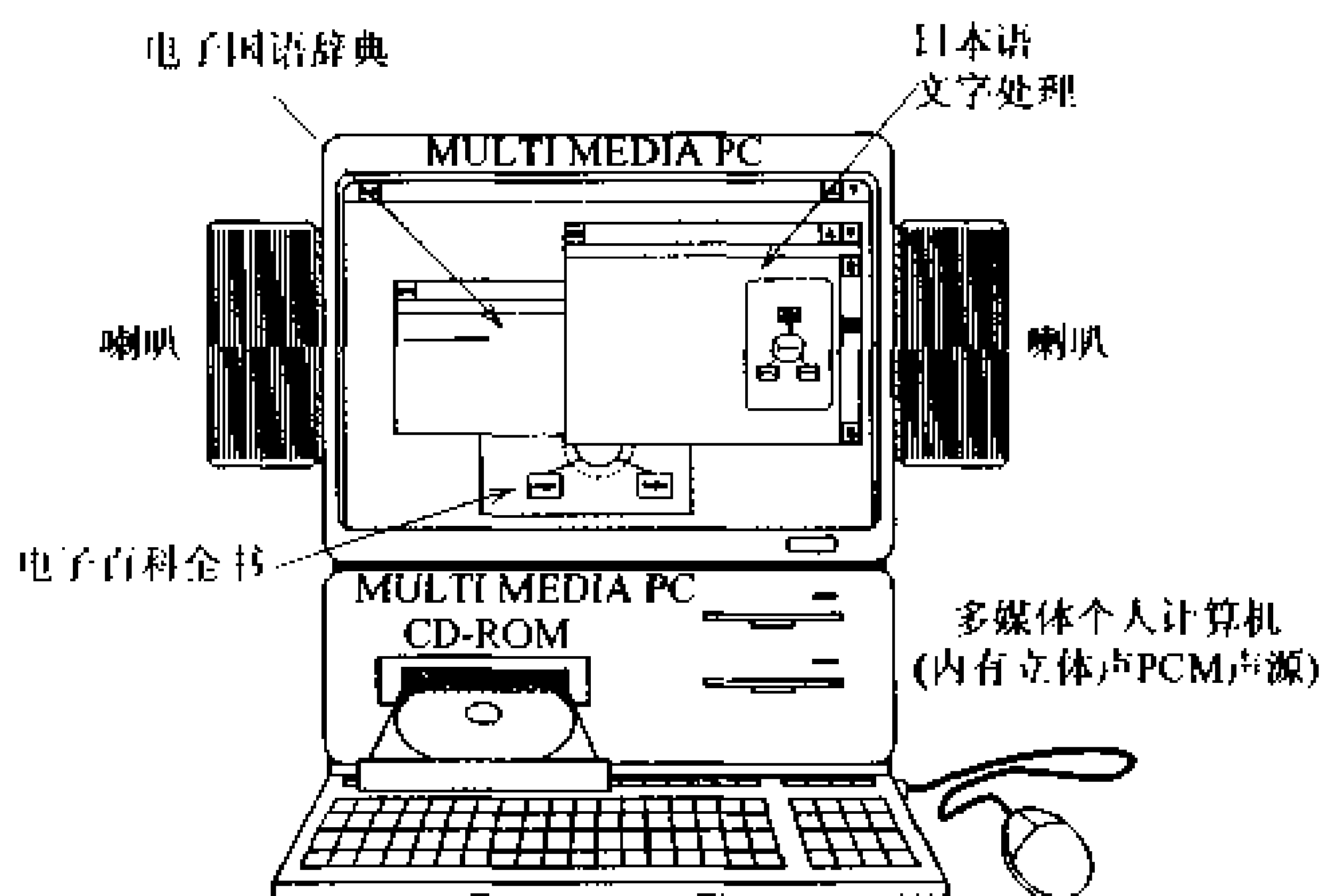


图 9.60 多媒体实例

### ⑤ 多媒体应用软件开发。

语音、音乐领域已经有了 CD、DAT、MD 等数字音频设备，图像数据和大容量数据的存储也有了 CD-ROM 等。要将动画等图像领域用多媒体来处理，必须将其数据压缩到与音乐或语音同一水平。现在，MPEG 所提出的运动图像数据压缩方式已成为国际标准（参看本章末页）。

MPEG

### ● 组件型多媒体与网络型多媒体

多媒体可分为组件型和网络型。图 9.60 所示的给计算机装上 CD-ROM 等软硬件来独立使用的是组件型，多媒体与通信线路相联接的在线方式称为网络型。

## □ 相关知识 ● 信息压缩

高效编码

为了既高效又经济地存储和传送从声音或图像等模拟信号变换成的数字信号，必须对数据进行压缩处理。这种处理称为高效编码或信息编码。运动图像的信息量大，因而要采用专门的运动图像编码技术。

帧间相关编码

帧电视图像与紧前面的一帧相比，图像内容的变化是很小的。采用只对这一变化部分编码的方法能大大压缩数据。重现的时候可以把已经恢复了的前一帧图像重新加进来而得到本帧图像。这种方法称为帧间相关编码。此外，还有利用人眼特性和图像变化量特性的技术及将图像模式化来进行压缩的技术等。

# 16 计算机图形学

□ 要 点

计算机图形学是指用计算机绘制图形、画面和图画等,以计算机辅助设计(CAD)为首,在医疗、教育、电影等许多领域得到了应用。

□ 解 释

● 计算机图形学描述

将想要画的锥型变换成数学模型,按照能生成视觉上有自然感的图形或图画快速地画出它们的形象。

图 9.61 示出计算机图形学所需的硬件构成。

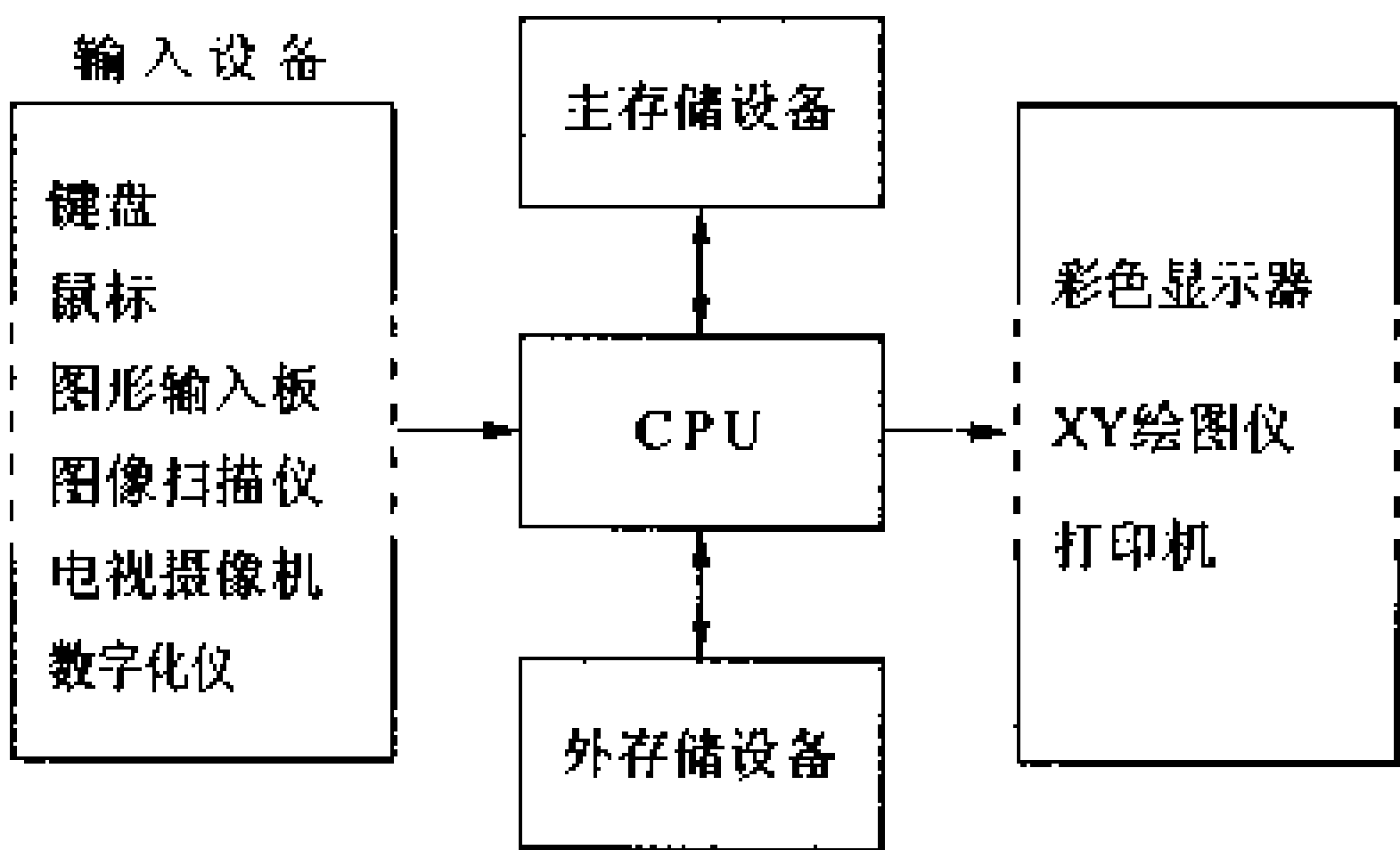


图 9.61 计算机图形学的硬件构成

这些设备并非全部都需要。直观显示、商业广告等商用计算机、需要用装备高速 CPU、大容量主存储设备和大容量辅助存储设备的大型系统,而个人计算机的 CAD 中,输入设备可以用键盘和鼠标,输出设备可以用彩色显示器和打印机。

## ● 二维图形学和三维图形学

制图中的平面图形可以用二个坐标轴(x 轴和 y 轴)来描述,这种用二维描述的图形学称为二维图形学。能够看出显示物体立体关系的描述称为三维图形学。

描述三维图形形状模型依其数据种类有线模型、面模型和体模型三种。

## ● 线模型

如图 9.62(a)所示,显示物体是仅由其轮廓的顶点和连接顶点的棱线构成的图形,所显示的图形反映不出表面和里面的内容。

二维图形学  
三维图形学

这种方法数据量小,也易于处理。

### ● 面模型

如图 9.62(b)所示,它是在线模型上加上面的概念来表现物体图形的。这种方法不能描述隐藏在图形里面的部分。通过阴影处理能获得写实的表现。

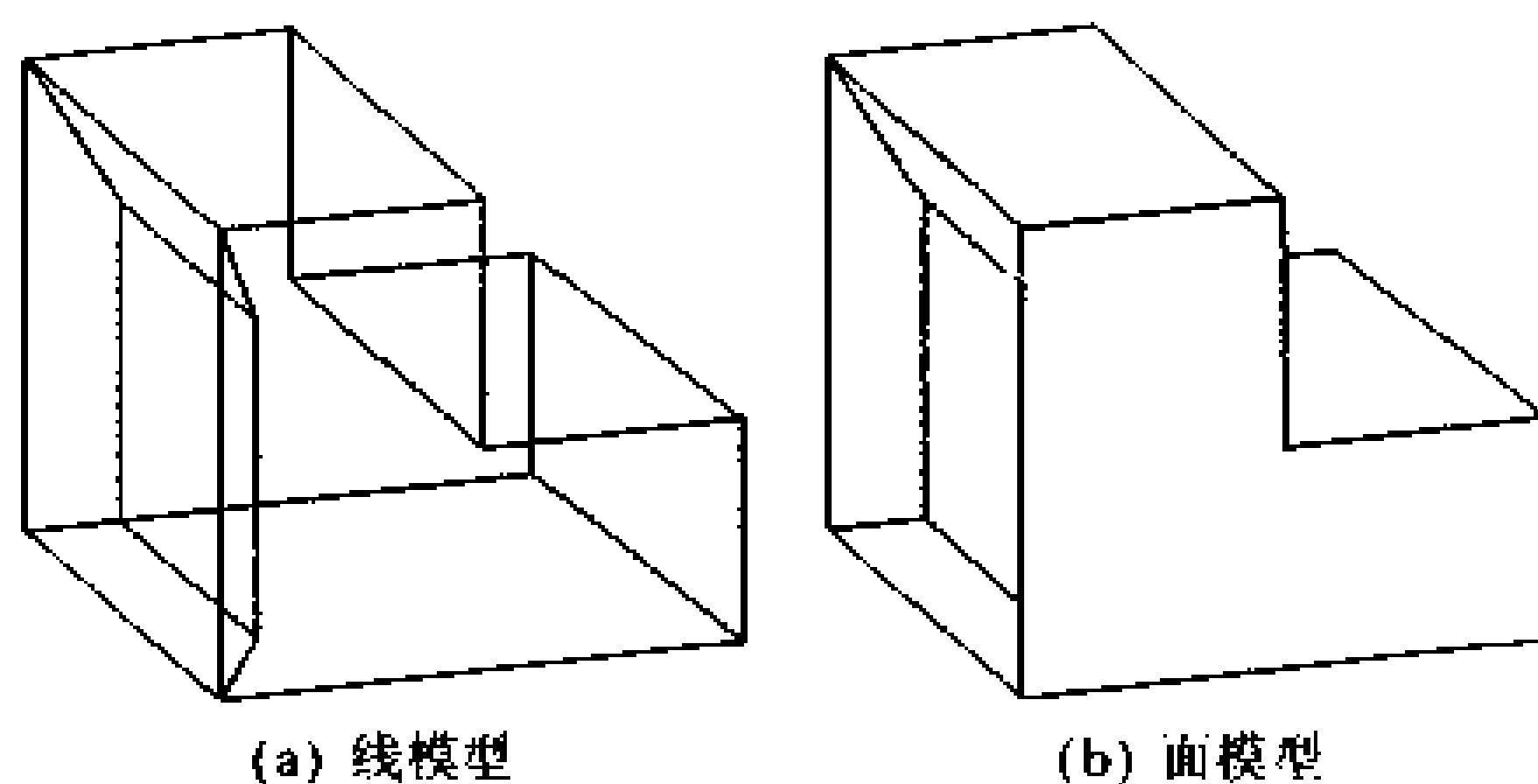


图 9.62 三维图形学的模型

### ● 体模型

可以认为是能够表现物体内部状态的模型。这种图形在任何部分截断,都能显示出断面。体模型是 CAD/CAM 领域引伸出来的应用。

## □ 相关知识 ● CAD/CAM

CAD(computer aided design)是指由计算机支持下的设计和制图来自动生成用于加工的 NC 数据。CAM(computer aided manufacturing)是指在计算机支持下的制造工程自动化,用 CAD 所生成的数据来制造产品。

### ● 视觉效果

用计算机图形学来表现物体的时候,为了使所显示的图形更有真实感,可采用在图形上附加明暗来显示光照情况,或者采用附加阴影及显示材料质地等处理方法。

### ● CD-ROM

CD-ROM 是 CD 应用的进一步发展。CD 最初是作为声频设备而开发的,因其能存储大量信息而进一步发展为计算机专用只读存储器 CD-ROM。CD-ROM 的存储量约为 640MByte,更大容量的 DVD-ROM 也已实用化。

### ● DCC(数字压缩盒式磁带)

DCC(digital compact cassette)是以磁带为存储媒体的数字声频设备。其磁带的尺寸、幅宽、带速都与模拟记录式压缩磁带相同,重放具有互换性。数字信息的记录采用了 PASC 高效编码压缩技术,数据量只有 DAT 的 1/4。

### ● MD(微型光磁盘)

MD(mini disk)是以光磁盘为存储媒体的数字声频设备。光磁盘的直径为 64mm,有多次录放和放音专用两种,可以像 CD 唱机一样随机访问。数字信息的记录采用了信息压缩技术(ATRAC),数据量约为 CD 的 1/5。

### ● MPEG

MPEG(moving picture image coding experts group)是国际标准化机构(ISO)下属的专门研究运动图像压缩技术的联合组织。MPEG1 是一种将运动图像压缩为 CD 及数字信息的编码方式。下表给出 MPEG 的内容。

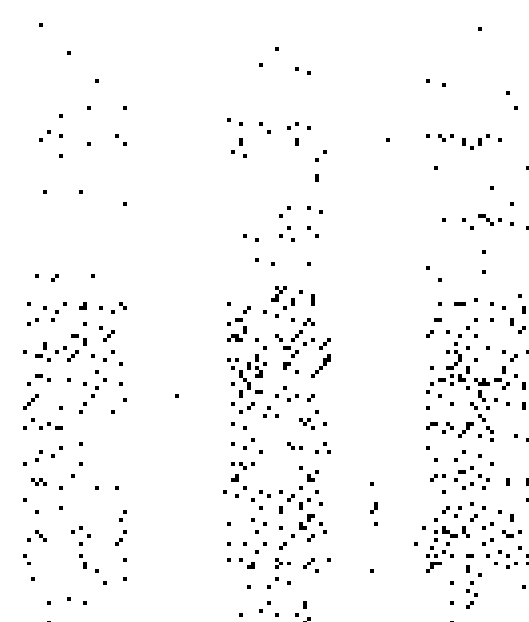
表 MPEG 的内容

	传输速率	内 容	应 用
MPEG1	~1.5Mbps	以 CD-ROM 和 ISDN 应用为目的,对声音编码也有规定	CD-ROM ISDN
MPEG2	15 Mbps	电视广播级动图像 与 HDTV 相对应	数字 VTR 数字视盘
MPEG4 (Phase4)	10 kbps	用于便携式终端 低传输速率压缩技术	便携终端 移动通信



## 第10章

# 各种电子技术 应用系统



- 责任编辑

福田 务

- 执 笔

福田 务(4~5、8、10、11)

矶上辰雄(1~3)

猪狩一三(6、7)

田中龙弥(9)

我们现在的生活环境，与以前相比，通信、医疗、交通等各方面都正在变得格外的便利与舒适。这些恩惠的带来，都源于电子技术的进步对工业的支持。

本章中，作为电子技术应用系统，主要介绍移动通信综合业务数字网(ISDN)、多媒体、激光加工、订座系统、全球卫星定位系统(GPS)、航空交通管制、计算机断层成像等代表性系统，并对相关的电子技术应用装置也进行一些介绍。



# 1 移动通信系统的构成

□ 要 点

移动通信用于不能铺设有线通信电缆的船舶、飞机、汽车、移动电话等,以及公共事业、广播、运输、工业等所有部门。而且伴随着通信的自由化,汽车电话、手提电话等移动通信随着技术的进步获得了飞速的发展。本节以电信工业中的汽车电话、手提电话等移动电话为中心进行介绍。

□ 解 释 ● 无线电波的利用

如表 10.1 所示,电信局间通信、移动通信、广播、无线电导航、业余无线电爱好者活动等各部门都要利用无线电波,电信法对其目的和用途分别做了规定。表 10.2 给出了利用无线电波的电信事业一览表。

表 10.1 无线电波的利用

3kHz	30kHz	300kHz	3MHz	30MHz	300MHz	3GHz	30GHz	300GHz
超长波 VLF	长波 LF	中波 MF	短波 HF	超短波 VHF	极超短波 UHF	微波 SHF	毫米波 EHF	
• 电波导航	• 信标 • 导航	• 船舶通信 • 中波广播 • 业余波段	• 船舶通信 • 航空通信 • 短波广播 • 国际广播 • 业余波段	• 沿海通信 • 警察通信 • 消防通信 • 航空通信 • 袖珍传呼机 • 电视播放 • 调频广播	• 汽车电话 • 手提电话 • PHS • 航空雷达 • 远程终端系统 • 出租车通讯 • 电视播放	• 微波中继 • 卫星广播 • 雷达	• 雷达 • 简易地上通信	

● 汽车电话的开发

大区方式

小区方式

汽车电话是 1961 年左右使用 400MHz 频带以大区方式开发的,当时尚未达到实用化。其后,於 800MHz 频带使用自动跟踪和电子交换机按小区方式进行了开发并达到实用化。大区方式是以很大的地域作为服务区,并在中心设置基地局,以复盖一个地域的方式,构成简单而经济。共用频带的 MCA(多通道收发)方式在运输业中广为利用。

表 10.2 利用无线电波的电信事业

	系 统	频 率(MHz)
汽车电话 手提电话	车载电话或手提电话与一般电话间的移动通信	800MHz 频带/900MHz 频带/1.5GHz 频带/1.6GHz频带
PHS	PHS 与 PHS 间,或与一般电话、手提电话间的简易手提电话	1.9GHz 频带
袖珍传呼机 (无线传呼)	用一般电话呼叫传呼机,或用信息通知	150MHz 频带/250MHz 频带
远程终端	无线联结手提终端与计算机的双向数据通信	800MHz 频带/900MHz 频带

● 移动电话系统的构成

手提电话与汽车电话属于同一系统,使用同一频带。手提电话小型轻巧,手持行走便利。通信方式为图 10.1 所示的小区方式。这种方式是天线发射的无线电波输出很小,到达范围仅限于3km~5km 的小区域。这样就可使稍远的小区也能使用同一频率,以适应无线电波的有效利用和移动电话需要的增加。基地局和移动电话间的联系,模拟方式时是将所分配的频带以一定的频率间隔分割成多个频道后,用其中空闲的频道将它们联系在一起,这称为频分多路(FDMA)方式。数字通信时则使用时分多路(TDMA)方式联系。

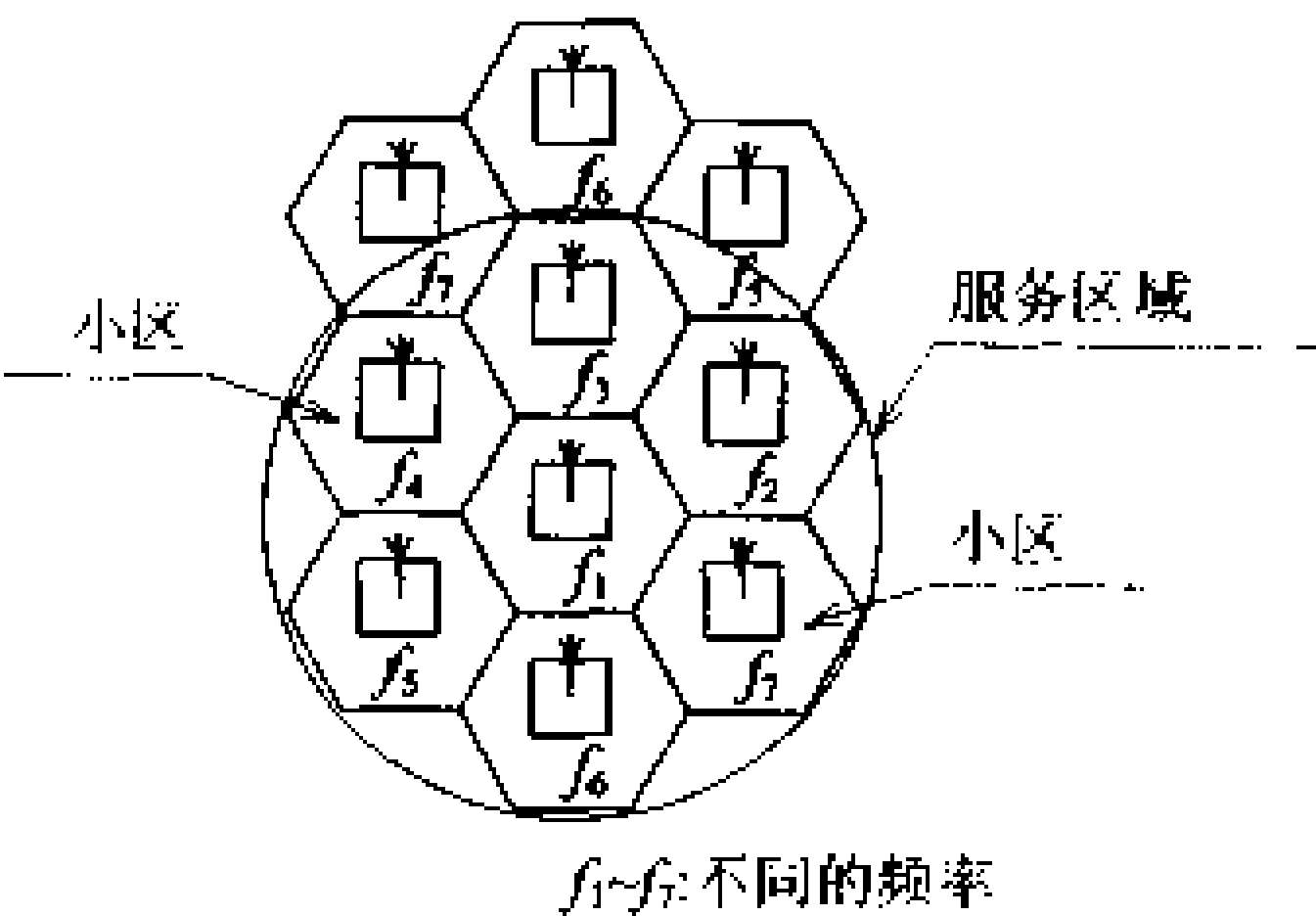


图 10.1 小区方式

无线电基地局  
无线电回路控制局

移动电话系统,如图 10.2 所示,是由设在各区的无线电基地局(MBS)、统管多个MBS的无线电回路控制局(MCS)、连接各MCS

## 移动电话交换局 家庭地址登记局

与一般电话网的移动电话交换局(AMC)以及登记用户地址的家庭地址登记局构成。

若用一般电话与移动电话通话,是经由一般电话交换机接到移动电话交换局。而移动电话交换局则是先从家庭地址登记局查取登在其记录上的移动电话的位置信息,然后转入相应的无线电回路控制局,再由其管辖下的各无线电基地局一齐发出传呼信号。收到传呼的移动电话即可送出应答信号。收到应答信号的无线电基地局在向移动电话交换局发送应答信号的同时,发出指定通话信道信号,移动电话自动切换到指定的信道上,双方的通话即可进行。通话中移向其它区时,其周围的基地局会将接收信号最强的区当作移动的目的区而切换通话回路,同时更新家庭地址登记局中的用户位置记录信息,以保证通话不会中途中断。

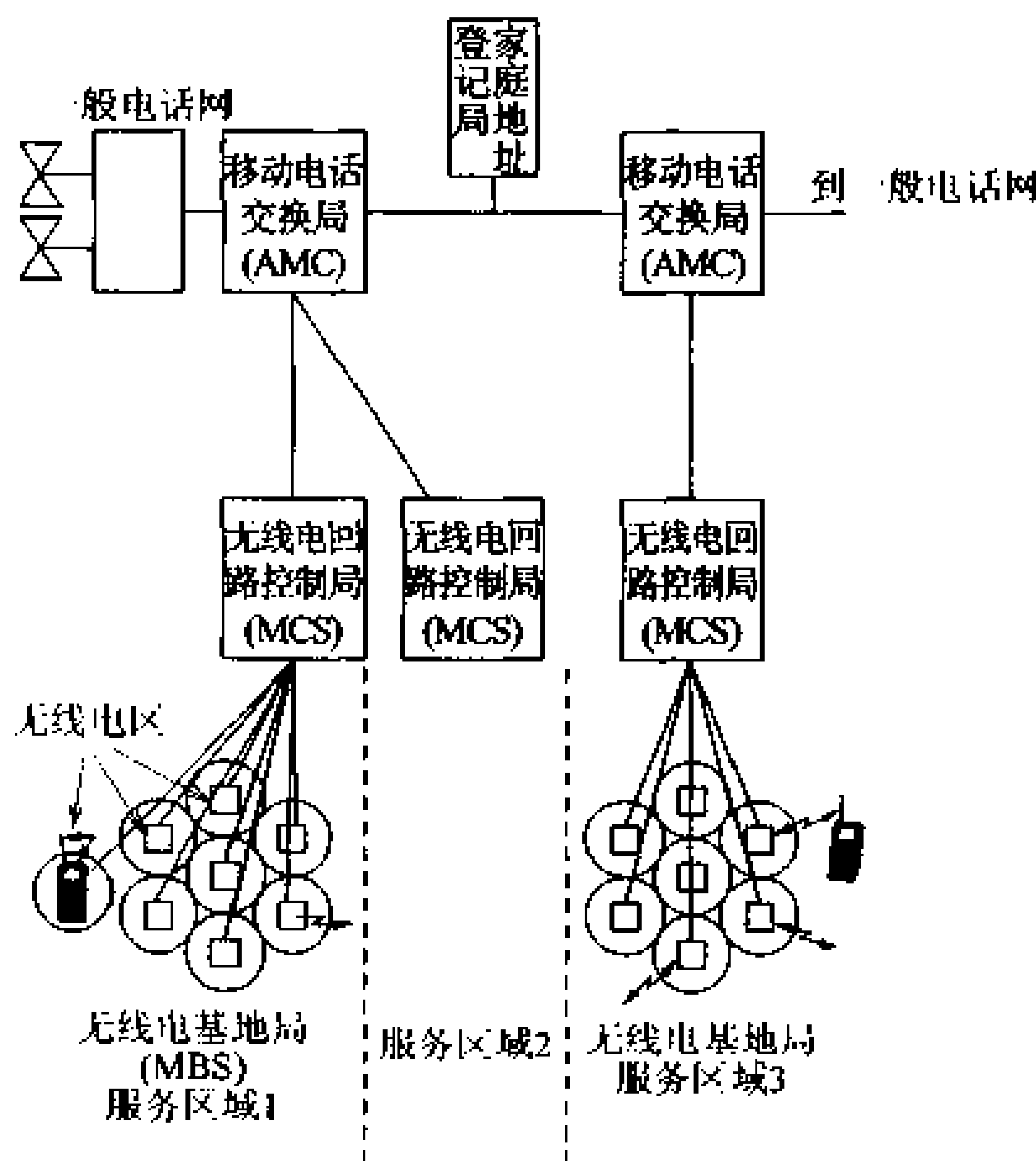


图 10.2 移动电话系统

### ● 袖珍传呼机(无线传呼)

带有电话号码的袖珍传呼机,可从一般电话机上拨其传呼号,用无线传呼台发出的无线电波对其进行呼叫。这种系统即为无线传呼通信系统。其传呼方式有发声、数字显示、信息显示等方式。

## 2 ISDN 的构成

### □ 要 点

社会在向着计算机化、信息化发展的同时,电话交换服务也不会仅仅停留于电话通话,数据通信、传真、图像通信等通信方式则显得愈来愈必要。

这些通信系统,作为满足各自目的的各个通信网进行开发时,不是非常经济有效的。为此,作为解决这些通信问题的通信服务系统,开发了信息数字化综合处理通信网 ISDN。

### □ 解 释 ● 电话网的数字化

ISDN

图 10.3 展示的是从中继线数字化开始,朝着交换机数字化的电话网发展进程。这个电话网的进一步发展,即为从电话机到电话机的全电话网的数字化高速高质量的通信业务网 ISDN(Integrated services digital network;综合业务数字网)。

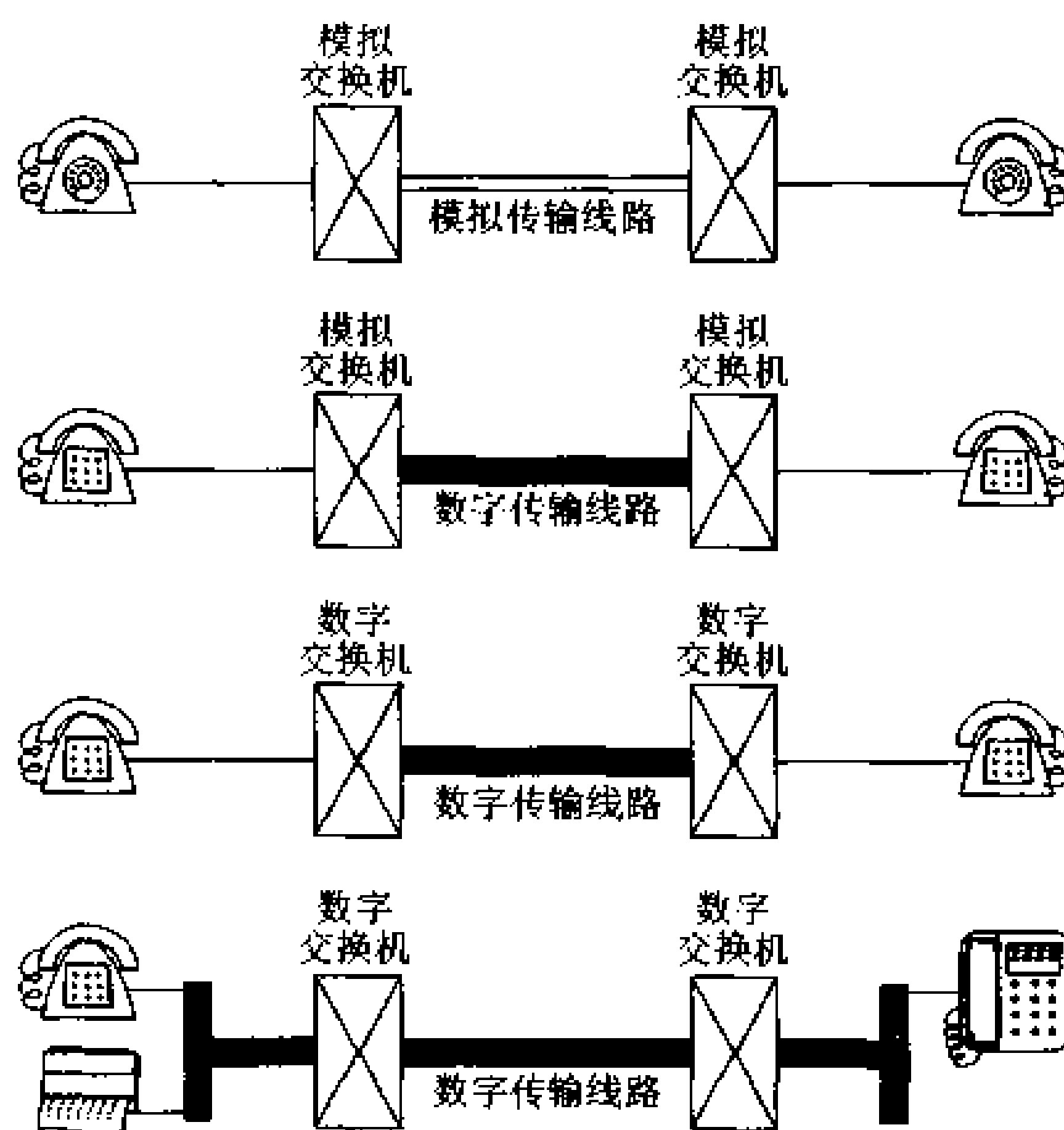


图 10.3 电话网的数字化

### ● ISDN 的构成

ISDN 如图 10.4 所示,是可以将电话、数据通信、传真、图像通

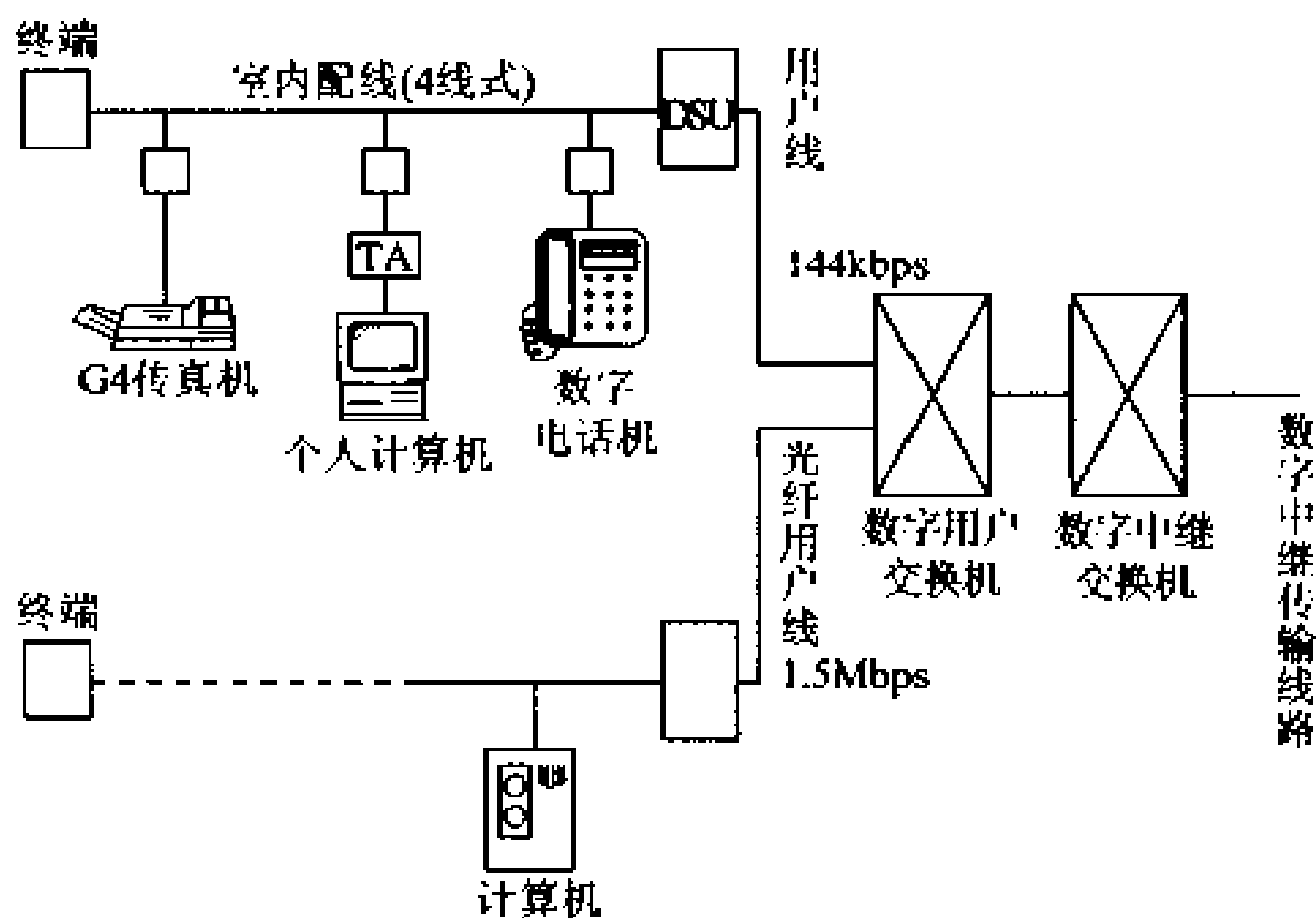


图 10.4 ISDN 的构成

## INS 网

信等信息数字信号化,并通过一根数字线进行传输和信息交换的通信服务。NTT(日本电报电话公司)从 1988 年开始以“INS 网”名称开始服务业务,其传输有速度为 64 kbps 的 INS 网 64、速度高达 1.5 Mbps 的 INS 网 1500、以及连接 DDX-P 的 INS-P 三种。

ISDN 中使用统一的新型接口与电话机、传真机等终端装置连接。也可通过终端适配器(TA)连接已有的电话机和传真机。

图 10.5 示出了 ISDN 的基本接口。图 10.5(a)中,INS 网 64 提供两个 64 kbps 的、线路交换用的 B 信道和一个用于信令及分组交换用的 16 kbps 的 D 信道。B 信道可同时作为多个用户终端来使用,最多可以连接 8 台设备。图 10.5(b)是 INS 网 1500,它可组合成“23B+D”(23 个 B 信道和 1 个 D 信道)的配置或 1536 kbps 的高速传输,传输总速率可达 1536 kbps。

ISDN 的附加业务有发信者电话号码的显示、话费通知、三方通话等。也可以有电子邮件、家庭银行等业务。ISDN 是符合 CCITT 标准的网络,因而也可直接与海外连接。

### ● 宽带 ISDN

速度 1.5 Mbps 的 ISDN,不能用来传送电视信号、动画以及超高速数据等。为此,开发了使用 ATM 交换机等新技术的速度为 155.52 Mbps 的宽带 ISDN(B-ISDN),它也可以传送高分辨率电视等图像。

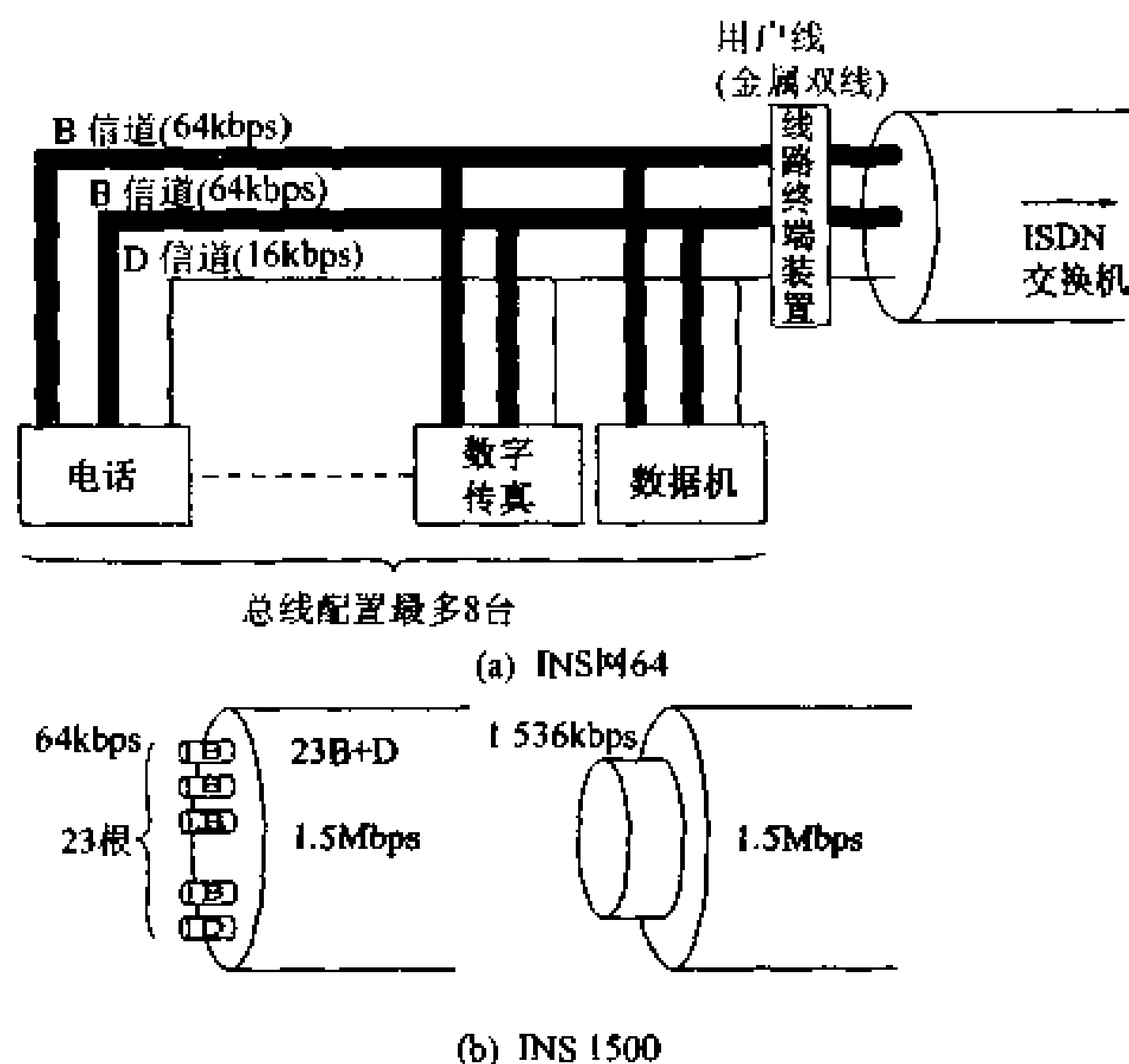


图 10.5 基本接口

### ● ISDN 的用户接口

ISDN 可以与数字电话机, G4 传真机等标准终端连接, 借助于终端适配器 TA 也可以与已有的电话机和传真机连接。ISDN 的接口制订有国际标准, 世界各地符合此标准的终端都能使用。

ISDN 基本接口由传递信息(线路连接)用的 64 kbps B 信道和传递信令用(信令及信令包用)的 D 信道构成。使用 D 信道, 可以显示对方的电话号码以及电话费。而且, 接上个人计算机还可以进行高速数据传送。

### 3 多媒体通信

#### □ 要 点

通过信息媒体、计算机、通信线路、有线电视(CATV)的连接和对多种文字、声音、图像等信息的处理,针对高质量大容量信息的需要,正确进行交互式传送的通信即为多媒体通信。

#### □ 解 释 ● 多媒体通信

多媒体通信,传送文字和图像的可视图文、电视会议系统以及电视电话等正在推广应用。这些系统,由于线路传送速度的限制,还不能传送精细的图像和动画。

今后,多媒体发展的重点是基于 ATM(非同步传输模式)技术的 B-ISDN 等超高速数据传送和双向网。

#### ● 可视图文

图 10.6 是可视图文(videotex)的系统构成。它是利用电话线或专用线路,将信息中心与电视接收机和键盘用户终端用专用适配器连接起来的会话型信息通信服务系统,根据用户要求,对存储于信息中心的文字和图像进行检索和显示。其可服务的业务有家庭银行、家庭购物、电子公告板(BBS:bulletin board system)以及电子邮件等。

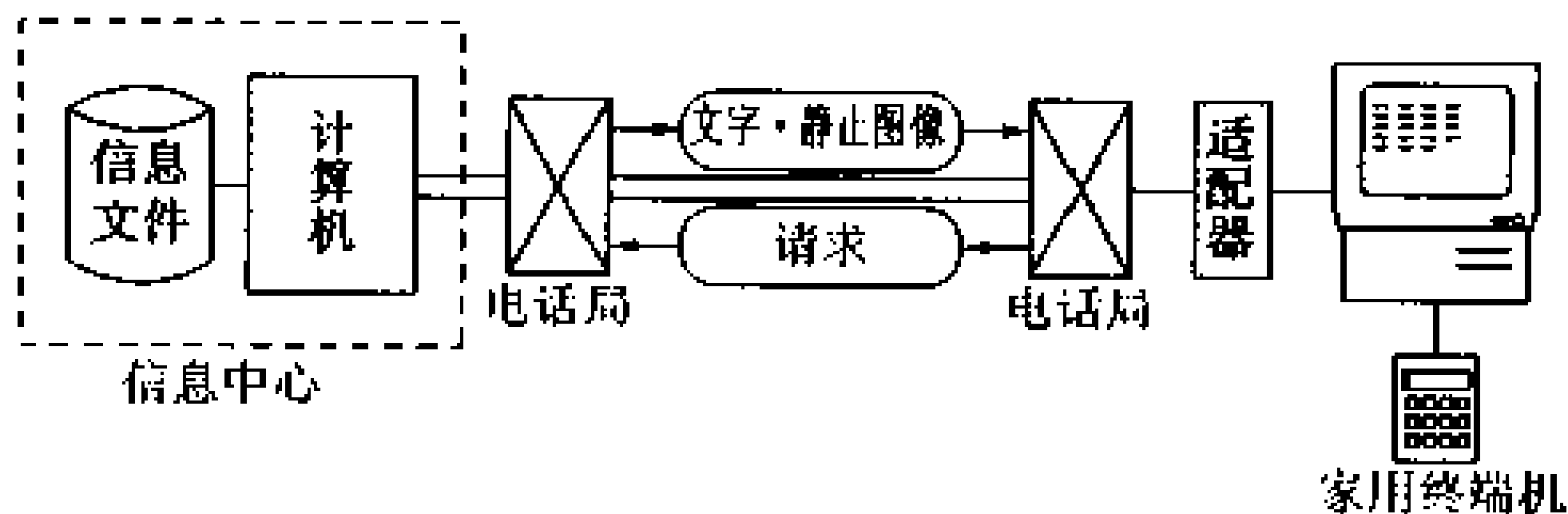


图 10.6 可视图文系统

#### ● 电视会议系统

设置一些电视摄像机、电视监视器及麦克风,将图像与声音信号组合起来进行传送的通信系统称为电视会议系统。通过监视器一边看着远方的与会者一边进行会议,既节省经费又节约时间,因而被很多企业所采用。使用高速数字线路的专用电视会议网正在铺设中。当然也可以利用 ISDN。

#### ● ATM 方式的多媒体网络通信

以动态图像为中心将声音、文字、图像等组合在一起，连接图 10.7 中的 ATM 和双向 CATV 所进行的通信才是真正意义上的多媒体通信。为此，基于 ATM 交换机和 B-ISDN 的高速宽带网的普及、图像信号等压缩技术的进步、能够对类似图像信号等大容量数据进行高速存取的超大容量存储器的开发，以及多媒体软件的开发等都正在获得发展。

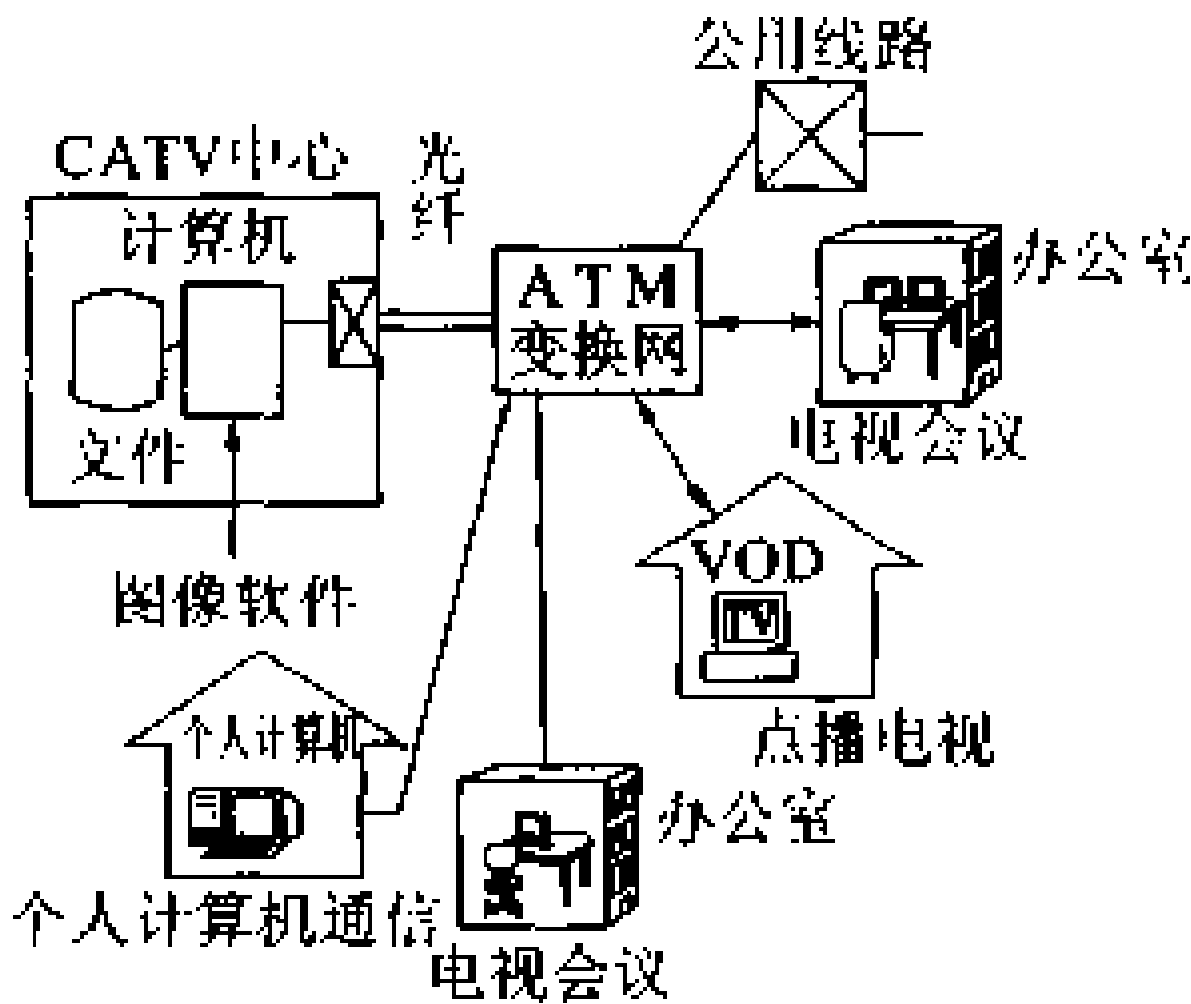


图 10.7 真正的多媒体通信

点播电视(VOD)

通过 ATM 与 CATV 的连接，能够在希望的时间看到想看的录像即真正的点播电视 (VOD)、也能够在一块屏幕上看到以多窗口的形式显示的图像资料、文件及远处与会各方的面孔而与对方开会。此外，还可以有种种依赖多媒体通信的通信服务业务。

□ 相关知识 ● ATM 方式(非同步传送模式)

细胞

将要传送的信息分割成一定的长度，再附加上接收方的信息，构成信息块(称作“细胞”)，然后按信息块进行传送。这种传送方式即为 ATM 方式。因“细胞”的多重化而适于高速大容量的传送。ATM 交换机是直接由硬件开关交换连接的，因而即使是数百 Mbps 的信号也能交换连接。



## 4 激光加工

### □ 要 点

激光引起了光通信、医疗、精密加工等领域的技术革新。本章对激光基础及作为其应用的激光加工进行介绍。

### □ 解 释 ● 激 光

在超级市场的收款处,用激光照射印在商品上的条型码,即可记录商品的价钱。而舞台上,也可对重要情节使用红色或蓝色的激光进行渲染。激光就是这样经常用在我们身边。激光到底是什么?

#### 激光

激光(Laser)是 light amplification by stimulated emission of radiation 的字头缩写。意为“受激辐射的光放大”。激光,与自然光、照明及其它场所所用的光不同,它与利用电子管或晶体管所产生的无线电波具有相同的性质。

#### 相干

激光是相位相关的相干电磁波,它具有极其优良的指向性、单色性、相干性,能量高度集中,亮度很强。所谓相干指的是激光的光波并不是杂乱无章的,而都是相位相关整齐排列的波列,指向性说的是激光具有波束细而不发散的性质。并且,普通光含有各种颜色的可见光,复合后成为白光,而激光是单色光。相干性指的是,光波的峰与峰相遇时光照增强而变亮、峰与谷相遇时相互抵消而变暗的性质。激光因为具有上述这些性质而广泛应用于精密加工、医疗、通信等领域。

### ● 激光加工

激光的一个主要应用是激光加工。由于激光集束后获得的能量密度很高,能够熔化或汽化各种材料,因而可以用来进行切割、打孔、焊接等加工(图 10.8)。

#### 固体激光

#### 气体激光

激光加工,与利用电子流的电子束加工相比,在能量密度、非接触加工等方面很相似,但是激光加工可在空气环境中进行而无需真空,应用非常方便。而且由于激光是光,利用棱镜和反射镜即可很容易地对其进行操作。用于加工的激光有固体激光和气体激光,前者主要用于打孔,后者则用于切割、焊接、热处理等(图 10.9)。

固体激光,使用的传统工作物质是合成红宝石,红宝石的红色激光,来源于铬原子吸收光能后所发出的光(图 10.10)。红宝石激光,对于在大型金属薄板上打小孔之类的加工非常有效。但是其输出功率有限且中间需要一定的冷却时间,因而现在最普遍采

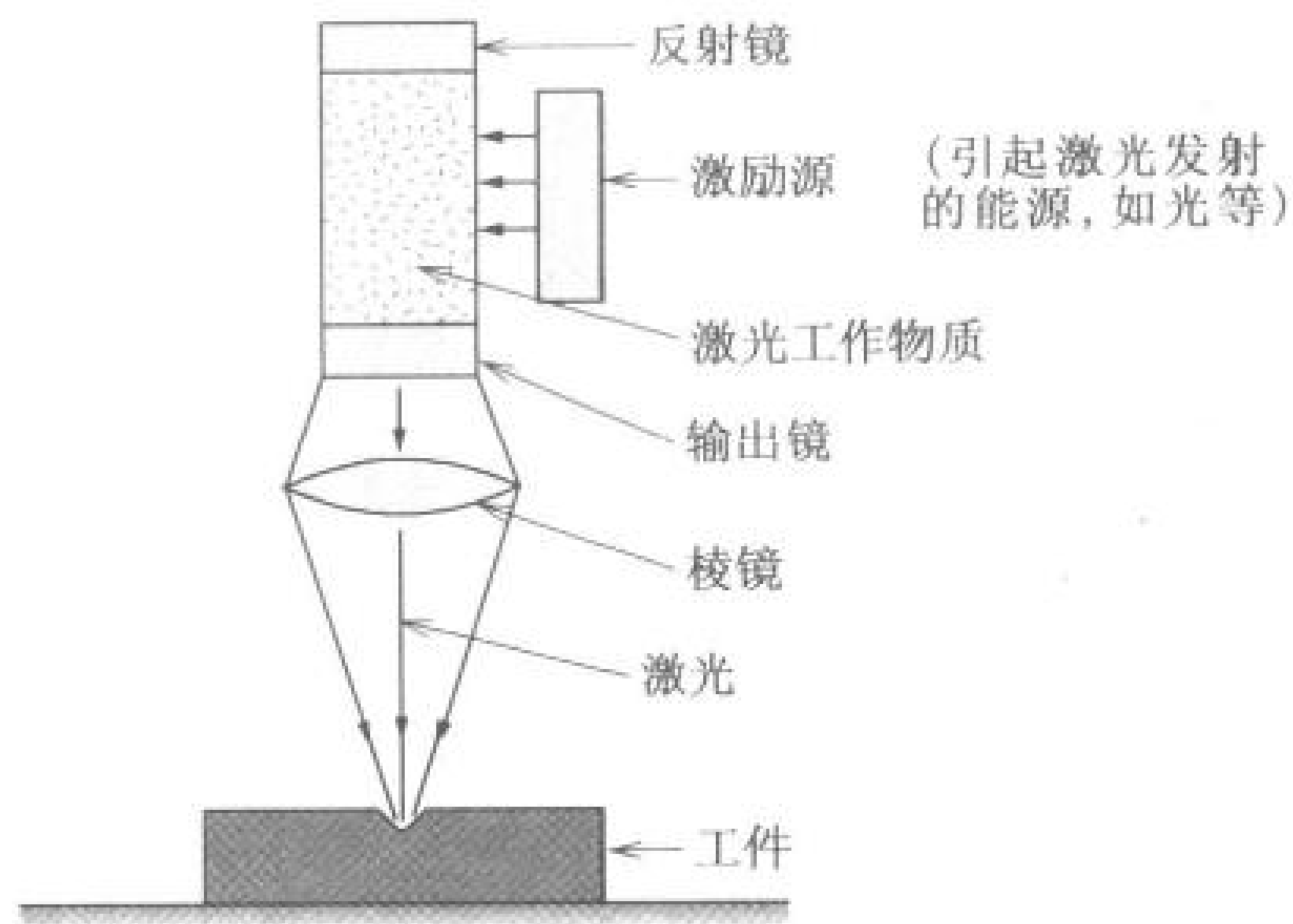


图 10.8 激光加工

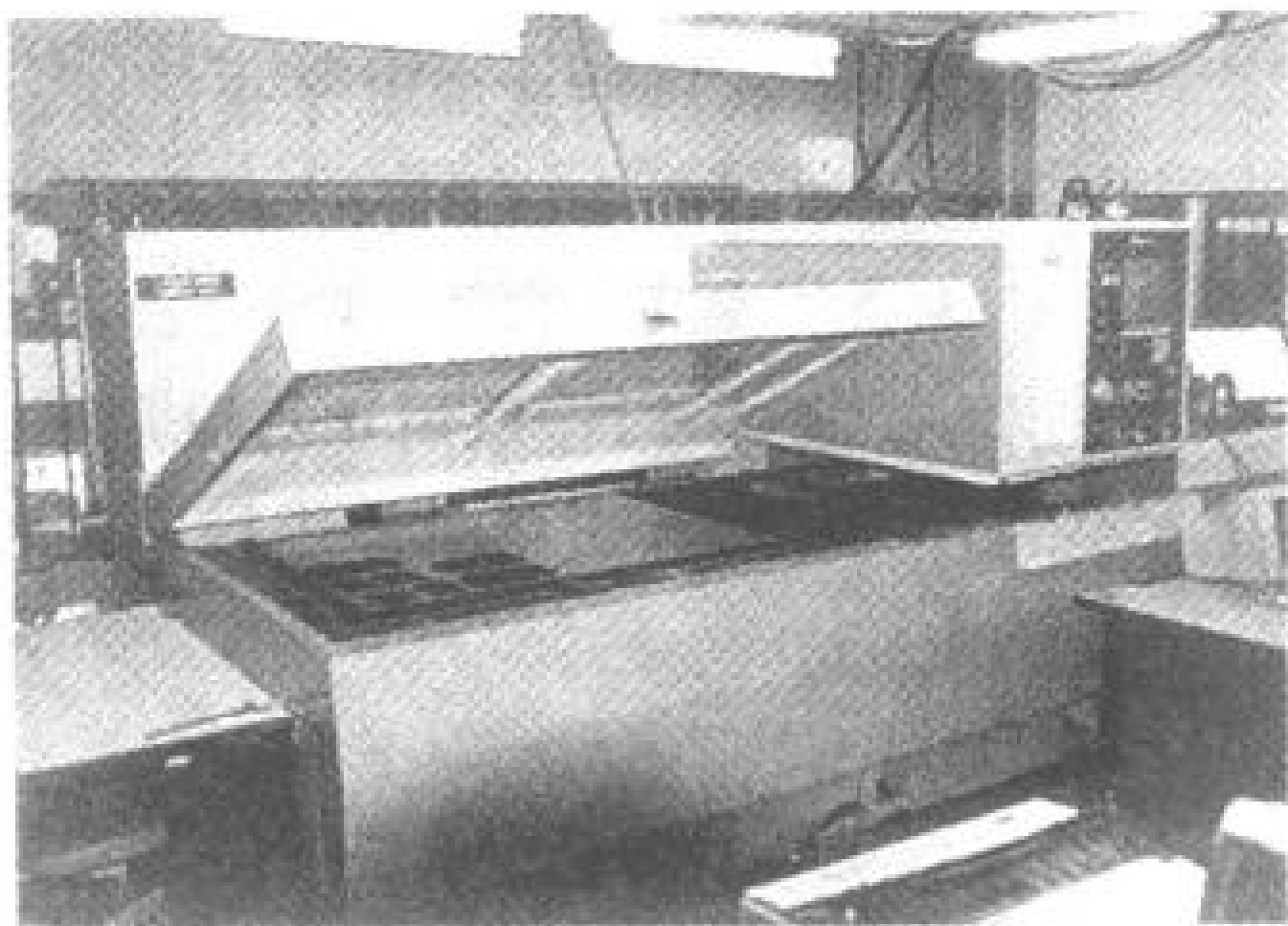


图 10.9 激光加工机(山崎 MAZAC)

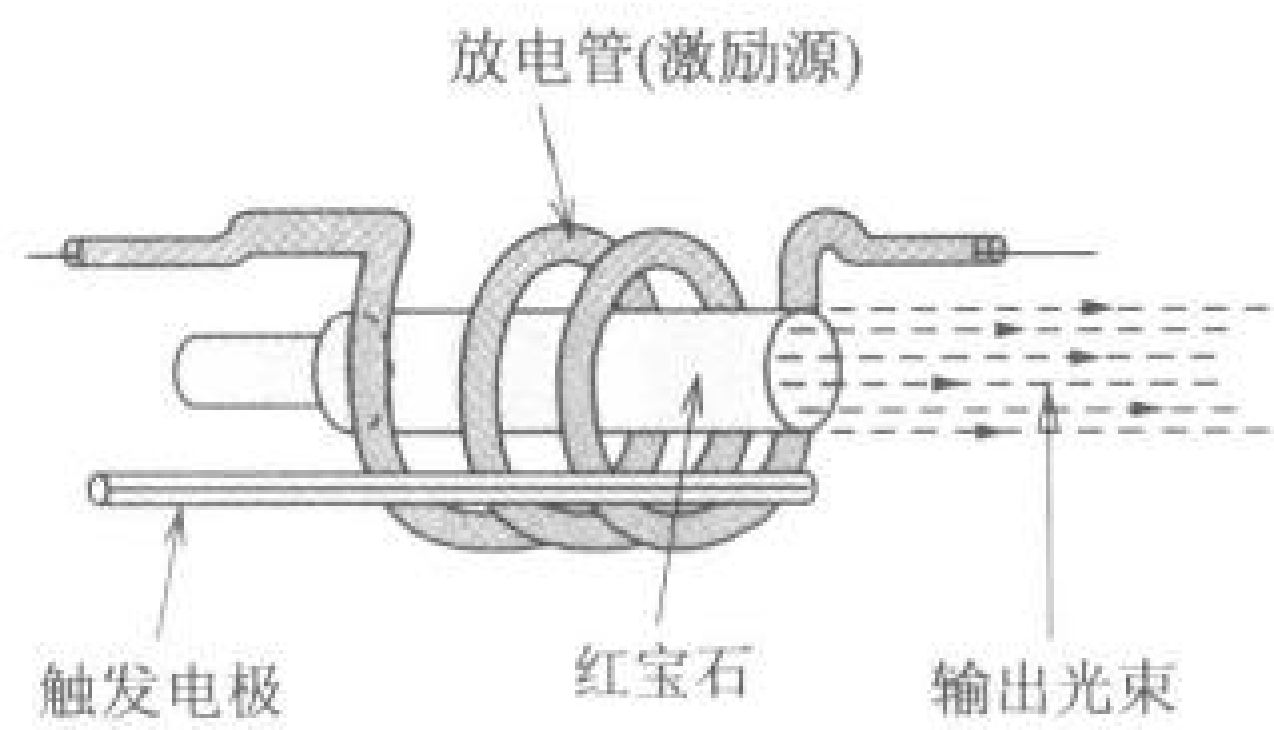


图 10.10 红宝石激光的发射

YAG 激光

用的是 YAG 激光。YAG 是钇铝石榴石 (yttrium、aluminium、gar  
net) 的英文字头缩写。YAG发出的强力激光束因其热传导性能好

而特别适于精密加工,但是能量利用率较低。

#### CO<sub>2</sub> 气体激光

典型的加工用的气体激光,是高效高输出的 CO<sub>2</sub> 气体激光。它连超强合金、耐火合金都可以切断。

##### ● 激光加工的优点

激光也可以用于材料的连接以及表面处理。特别是其能量密度很高(每平方厘米 1 兆瓦以上),因而可以灵活有效地进行切断。与其它热切断相比,切断速度非常快,精度也高,这是由于其很适合于计算机加工控制的缘故。总之,移动工作台、控制其上的激光束移动都很容易,因而可以使材料瞬间局部熔化。

CO<sub>2</sub> 气体激光与 YAG 激光相比,其优点是聚光时可以将光束聚得更细,YAG 激光的优点则是可以通过玻璃纤维来传输激光能量因而可以由机器人来进行切断。

#### □ 相关知识 ● 电子束加工

将高压加速的电子聚成束,用来轰击材料时,电子所带有的动能大部分会变成热能。利用这种热能使材料熔化或蒸发而去除的加工方法,称为电子束加工。电子束的位置、大小、强弱能够精确地控制,因而可以用于细微加工。但是必须在真空中进行加工,对于产生的 X 射线也要进行安全防护。

## 5 电子显微镜

### □ 要 点

电子束可以在电场或磁场中加速、聚集,因而可以与光一样有透镜聚焦作用。对于利用这种功能的电子显微镜,本章对其原理与功能进行介绍。

### □ 解 释

分辨力

#### ● 电子显微镜的原理

将邻近的两点能够分辨的限度称为分辨力。人眼的分辨力大体上为 0.1 mm,光学显微镜大约可以高到 0.0002 mm 的程度。增加光学显微镜中棱镜的段数,想来不管多么细微的东西都可以观察到。但是实际上观察会变得逐渐模糊不清。光学显微镜的分辨力可随光波波长的变短而增强,但即使使用波长很短的光,其分辨力最高也就 0.0002 mm( $2000\text{\AA}$ ,  $1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$ )程度。

电子显微镜中用电子束来代替光,电子束的方向可以用电场或磁场来控制,产生透镜聚焦效果,放置于电子束路径上的试件的像可以被放大。高速度加速的电子束的波长极短因而分辨力可以提高。例如,用 50kV 加速的电子束代替光时,分辨力可以达到  $30\text{\AA}$ ,有效放大倍数可以是光学显微镜的几十倍。

#### ● 电子显微镜的种类

电子显微镜一般分为透射型和扫描型。

#### 透射电子显微镜

**透射电子显微镜**(transmission electron microscope; TEM)是根据透过试件的电子束描绘出有浓有淡的平面图像。其构成与光学显微镜的原理非常相似。

该显微镜的组成,从显微镜上部开始,有电子枪、聚焦透镜照射系统、试件室、物镜成像系统、照像机等(图 10、11)。

电子束与气体分子碰撞时会被散射而改变其行进方向,所以电子显微镜的镜筒内要保持高真空。装置头部的电子枪是电子束的产生源,一般靠加热钨丝放出电子,对其施加高压(一般为 80kV~200kV)加速,即可向试件方向前进。聚焦以及调节放大倍数,可通过电气上改变物镜的磁场强度来进行。电子束不能直接用肉眼看到,所以最终要将电子打到涂有荧光涂料的荧光板上,间接地来观察图像。

#### 扫描电子显微镜

**扫描电子显微镜**(scanning electron microscope; SEM)是通过聚焦透镜以及物镜对电子枪射出的电子束进行集束的。扫描电子显微镜的分辨率在很大程度上取决于电子束能够收缩到多么细,

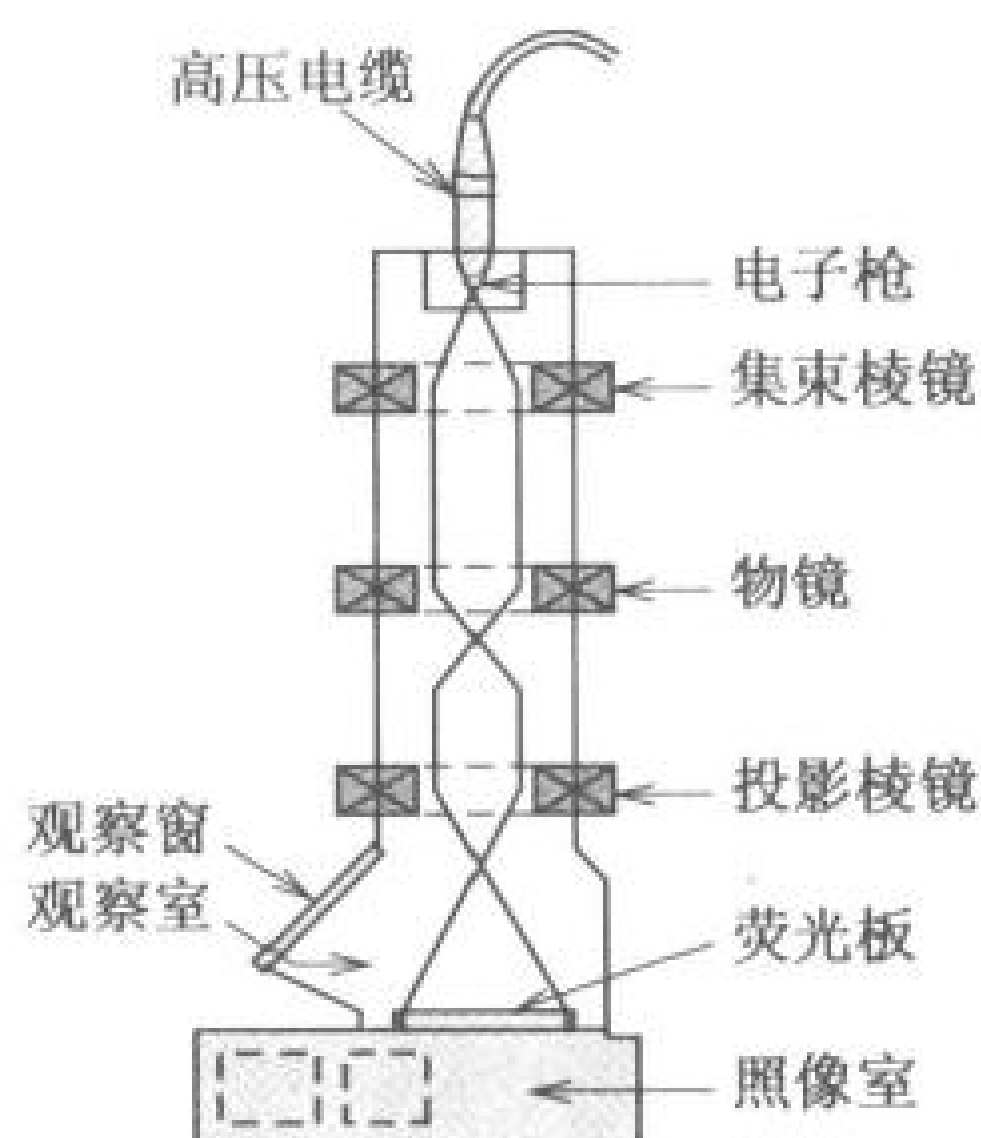


图 10.11 透射电子显微镜

即是说取决于多么细的电子束照射到试件的表面上。

将这种聚细了的电子束用扫描线圈使其扫描,如同电视图像的扫描线一样,对试件表面进行扫描(图 10.12)。这时,从试件表面产生的种种信息(二次电子、X 线等)中检出二次电子,将其转变为电气信号,放大后送入与扫描试件表面的电子束同步的阴极射线管,在此阴极射线管上即可显示出二次电子图像。

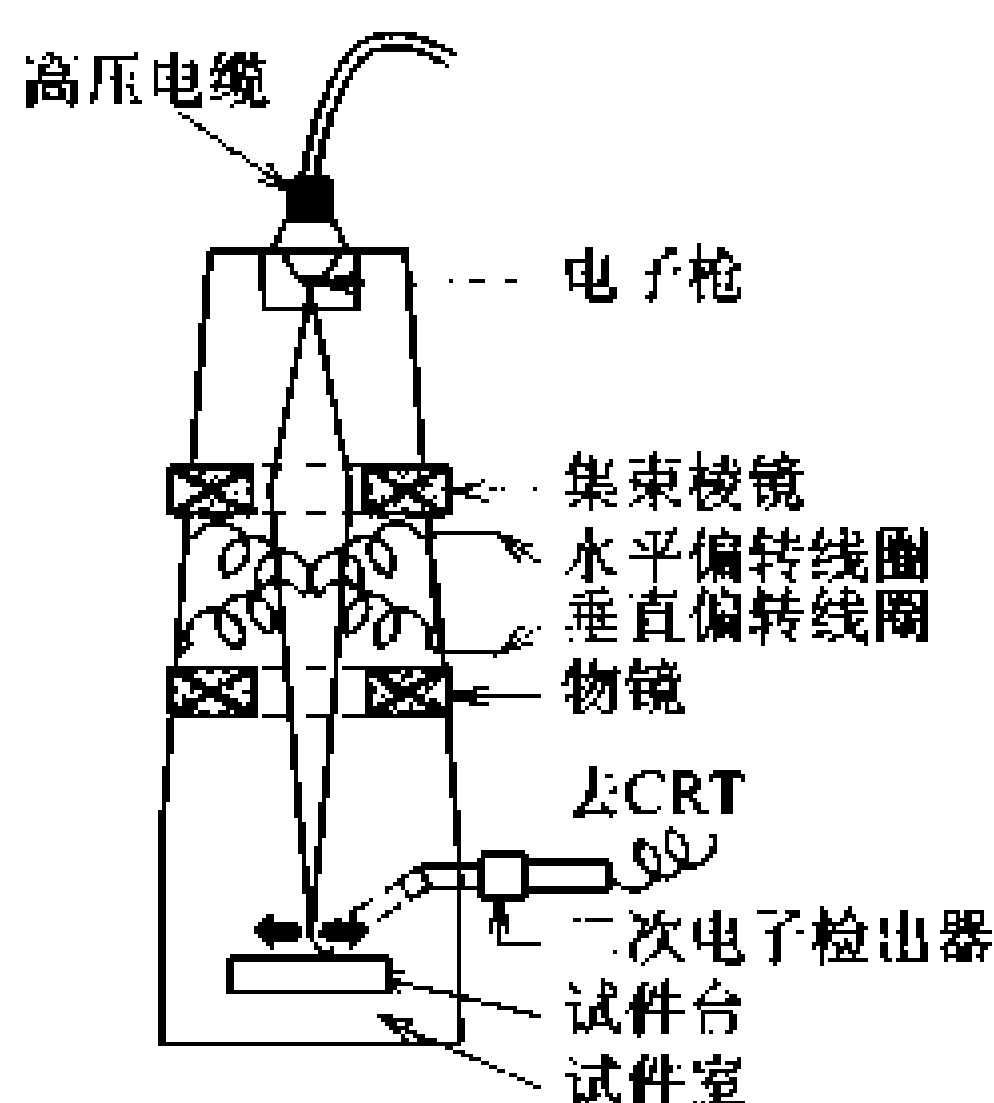


图 10.12 扫描电子显微镜

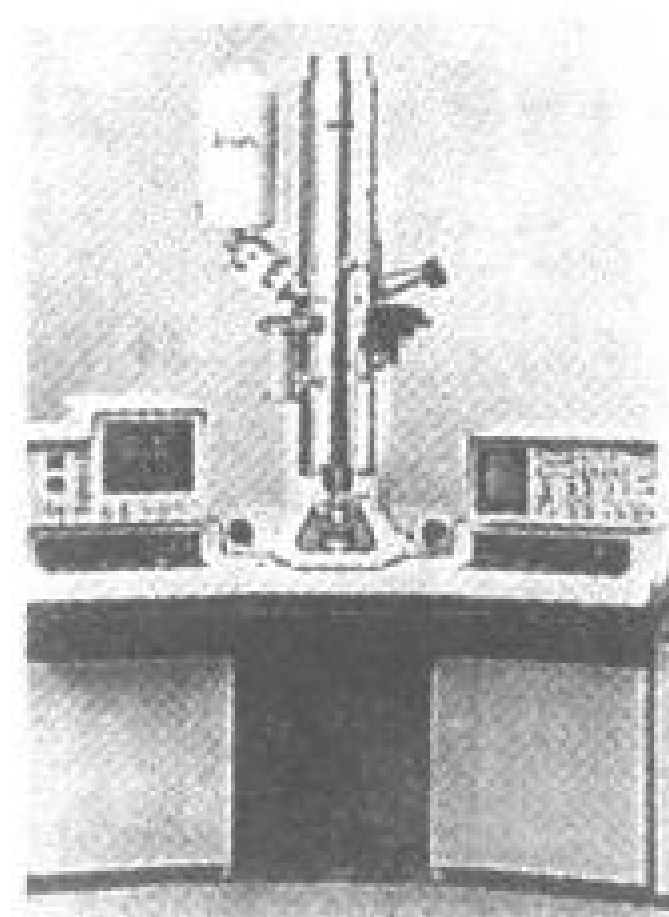


图 10.13 电子显微镜(日立 H-7100)

扫描电子显微镜的聚焦就是将电子束聚集得很细,放大倍数取决于试件扫描面积与阴极射线管面积之比。可见,扫描面积小时放大倍数高。其放大倍数最大也就 80 万倍,不像透射电子显微镜那么大,但是其特点对于具有复杂表面的试件也能进行立体的图像观察。

# 6 列车运行控制和安全信号设备

**□ 要 点** 本章就保障列车安全运行的基本问题及其安全设备等重要事项进行介绍。

**□ 解 释** ● 闭 塞

铁路运行时,最基本最重要的安全事项是列车不要相撞,这是最高原则。那么,列车相撞是怎么回事呢?这是同一时刻、同一位置有两列列车存在的缘故。因此,为了避免列车相撞,应该在线路上划分一定的区间,且每一区间内平常只能有一列列车存在。这种方法称为线路闭塞。

● 运行控制

以闭塞方法为基础,为保障列车安全正确运行的安全设备,可分为以下种类。

- ① 保持运行列车间间隔为一定距离的闭塞及其信号装置;
- ② 列车进入站内运行时,确保其通路的连动装置;
- ③ 检测列车车辆、线路异常,保护列车运行的各种报警装置。

这些装置相互紧密结合在一起,即可进行最基本的安全运行控制。列车运行的主要控制装置如表 10.3 所示。

表 10.3 主要的运行控制装置

运行控制	控制内容	基本设备		现代化设备
线路控制	线路设定控制	连动装置		ARC,CTC
间隔控制	列车间距、运行时间间隔控制	闭塞装置	ATS	ATO
操作控制	停车、减速、加速等控制	ATC		
运行监测控制	障碍物检测控制	各种报警装置		

ARC(自动线路控制装置)  
CTC(列车集中控制装置)  
ATS(自动停车装置)

- ① ARC(自动线路控制装置) 列车进入控制区间时,对线路上的信号机及转辙器自动进行控制的装置。
- ② CTC(列车集中控制装置) 将线路上运行的各列车的运行信息集中显示于总控制中心的显示板上,综合准确地为各列车提供线路、发布指令的装置。
- ③ ATS(自动停车装置) 司机对信号机的停车信号未看或

ATC(列车自动  
控制装置)

ATO(列车自动  
运行装置)

看错时发出警报、司机未进行规定操作时自动刹闸停车的装置。

④ ATC(列车自动控制装置) 按照与前方列车的间隔及线路条件,自动降低列车运行速度的装置。

⑤ ATO(列车自动运行装置) 除以 ATC 为基础的减速控制外,还对加速控制等列车操作控制、列车间时间间隔调整等自动进行管理的控制装置。

### ● 安全信号设备

铁路上安全信号设备多种多样。有直接与铁轨连接的转辙装置,电气法检测铁轨的绝缘和列车位置并通过各种继电开关进行信号显示的自动信号装置,ATC,以及利用计算机的 CTC 装置等。

这些安全信号设备的使用基础是利用铁路线路,即使用上述闭塞区间连续的线路,构成信号电流在线路上流动的电气回路,对列车和车辆能够经常检测的最确实可靠的方法和技术(图10.14)。这是铁路所有信号设备的根本。

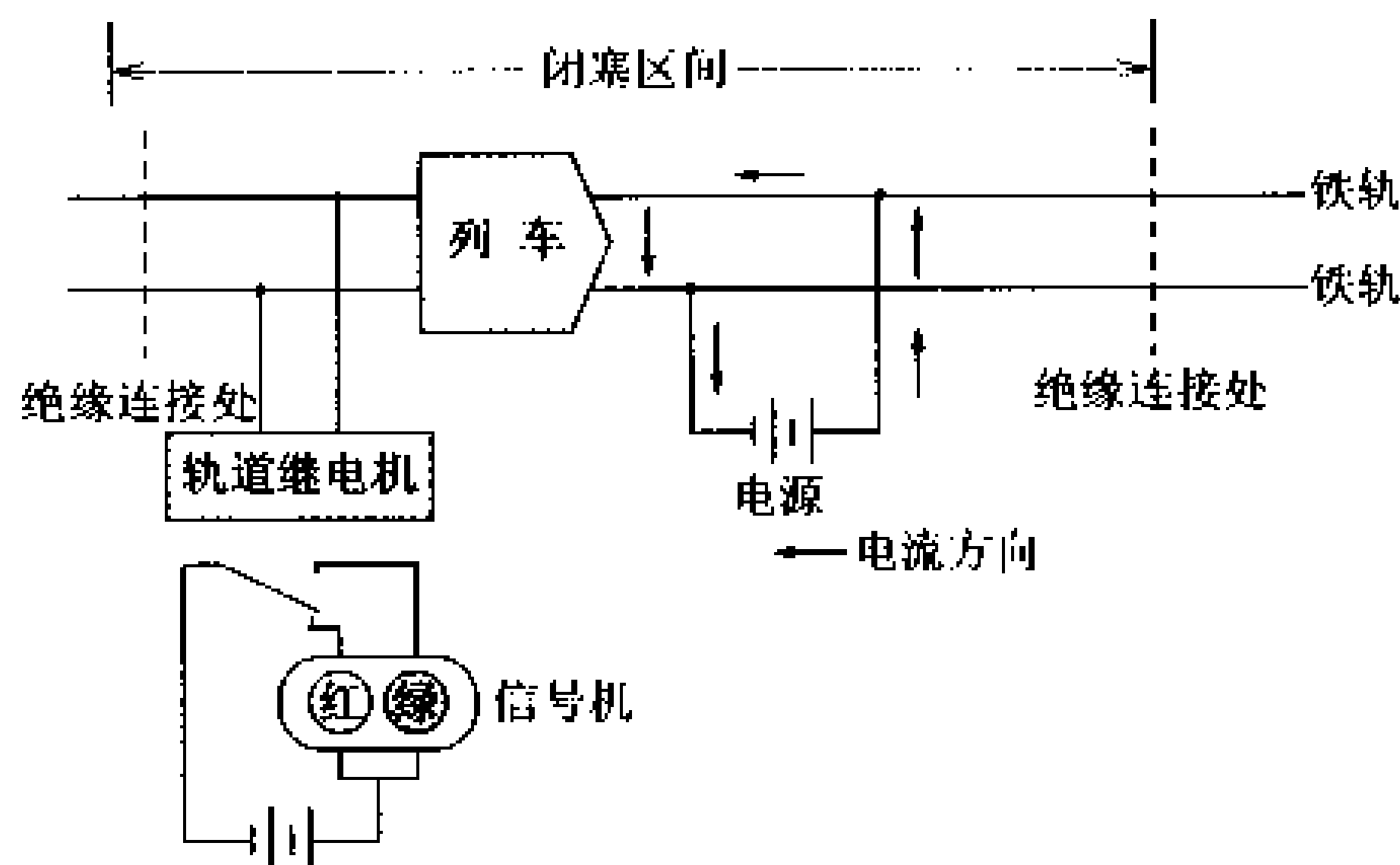


图 10.14 铁路信号电气回路

# 7 自动剪票和订座系统

□ 要 点

本章介绍铁路自动剪票机的构成以及订座系统的基本思想和系统构成。

□ 解 释

● 自动剪票机

费用存储系统

费用存储(SF)  
磁卡

JR 东日本车站从 1990 年 4 月开始引入自动剪票机,现在几乎所有的 JR 车站都使用自动剪票机。现在的自动剪票机比初期的型号具有更先进的功能,采用的是费用存储(stored fare)系统。该系统可将乘车费用,在自动剪票机内,从记录有某种总金额的磁卡中减掉,磁卡上只要还剩有钱就能乘车。JR 东日本车站的 IC 磁卡,就是这种费用存储(SF)磁卡。

● 自动剪票系统的构成

自动剪票系统是将自动剪票机、监视器、数据统计器及自动核算机用内线联结起来,对旅客通行进行快速检查。其中自动剪票机的构成,如图 10.15 所示,可以分为送票机构、旅客感知部、门、显示器、车票投入、取出口、废票收集箱等(图 10.15)。

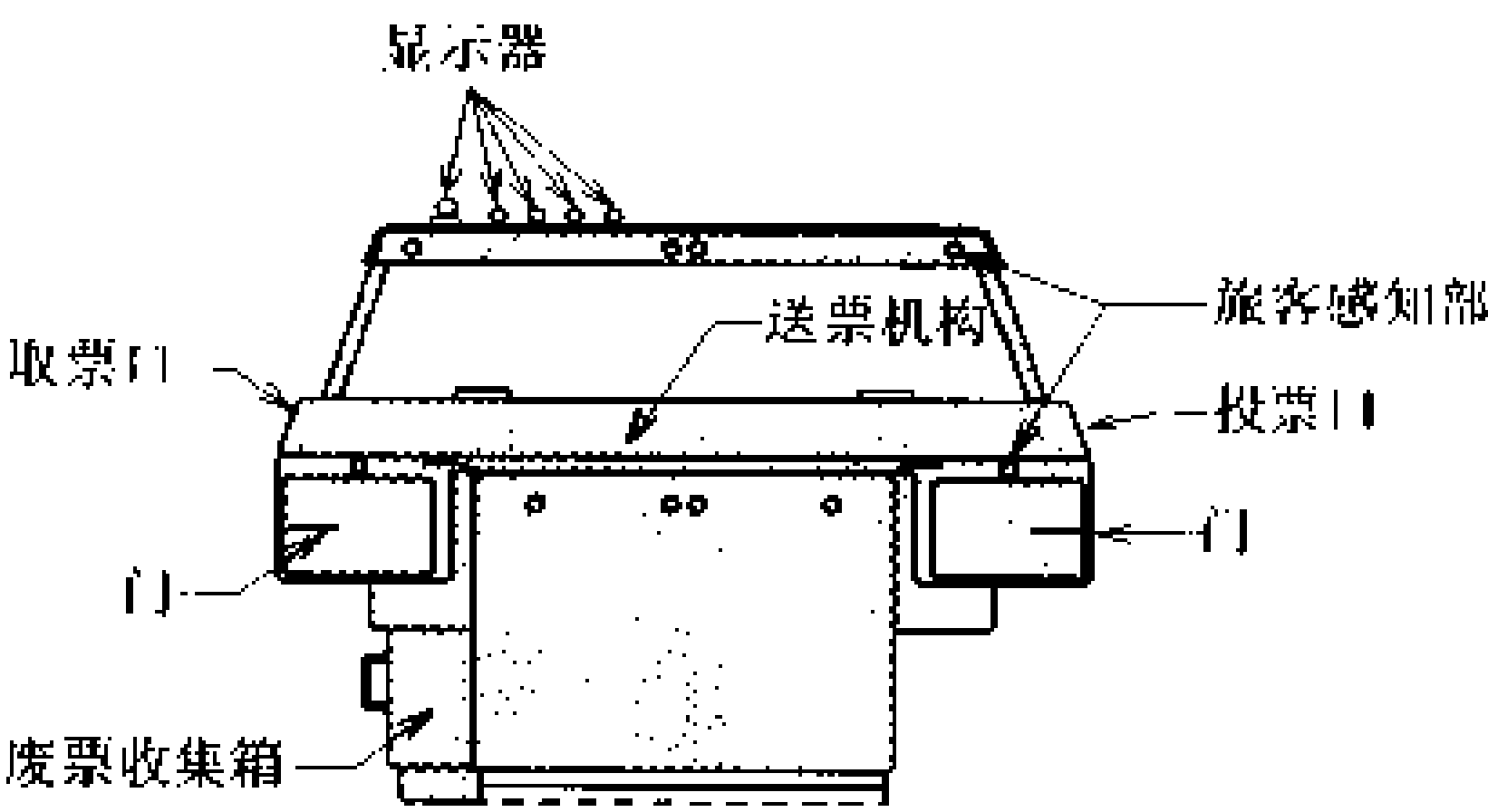


图 10.15 自动剪票机

送票机构(图 10.16)是对投入的车票进行判断并正确地将其送至取票口所必经的重要部分。这里进一步大致可将其分为车票整理部和信息读写处理部。JR 处理的车票形形色色,有 SF 磁卡、近距离车票(称为埃多蒙逊票,普通车票大小)、中长距离车票(大型券)、定期车票等等,其形状、材质、厚度、硬度各异。车票整理部将这种种随机投入的车票理顺,以便信息处理部处理。

信息处理部由类似磁带录音机上安装的那种磁头构成。在送



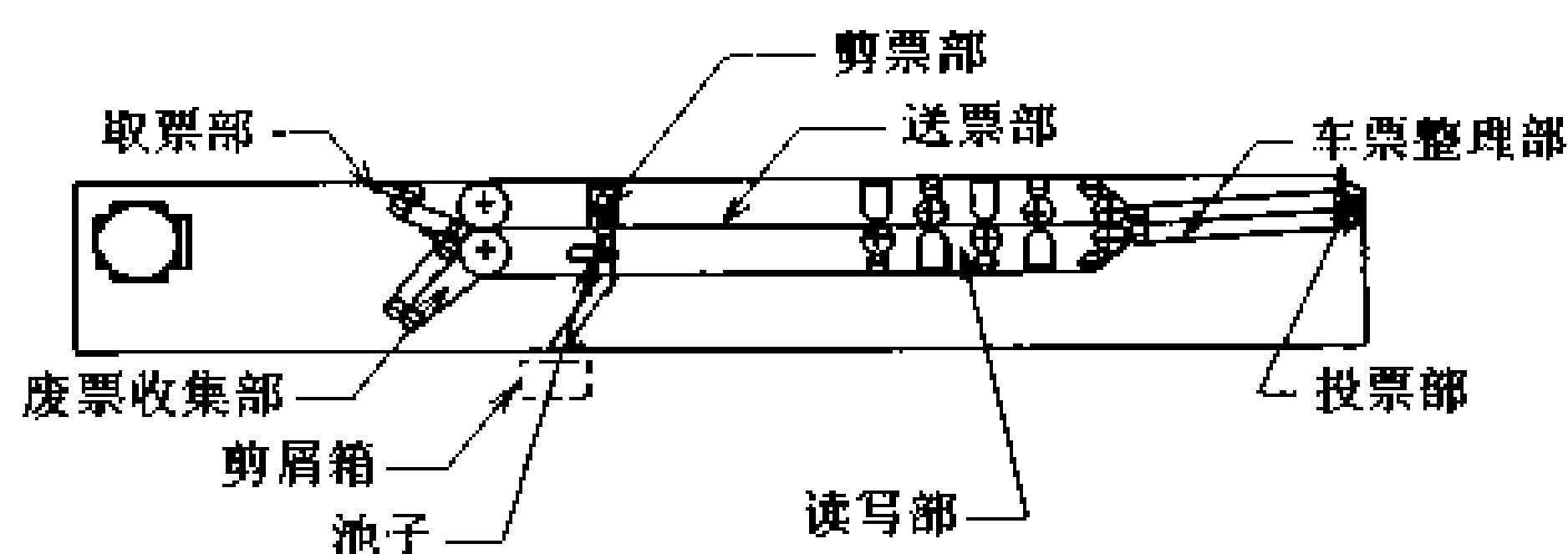


图 10.16 送票机构

票方向上,上下安装有读出、写入、确认三个磁头,构成一个单元。这个单元每天必须对成千上万枚各种车票进行正确、迅速地判断,因而它是自动剪票机的核心,制造要精良、耐用。

### ● 订座系统(绿色窗口和 MARS 系统)

以“绿色窗口”而闻名的 JR 车站的座席预订,不仅预订 JR 的各种车票,而且还包括与其它系统联营的诸如飞机票、旅馆住宿票等各种票证,遍及很多旅行商品。这些票证不仅可去车站的“绿色窗口”购买,也可以呆在家里用电话订购。支撑着这一密切关系市民日常生活的综合服务的是 JR 系统(铁道信息系统公司)管理的 MARS 系统。

#### MARS 系统

设置在绿色窗口的终端有 M 型和 L 型。M 型是能向旁边写有上车站名和下车站名的孔里插针的终端,而 L 型是以个人计算机为基础的小型化终端。现在在 JR, M 型终端配有 1200 台, L 型终端配有 1600 台,另外还有 1400 台配置在旅行社等处。

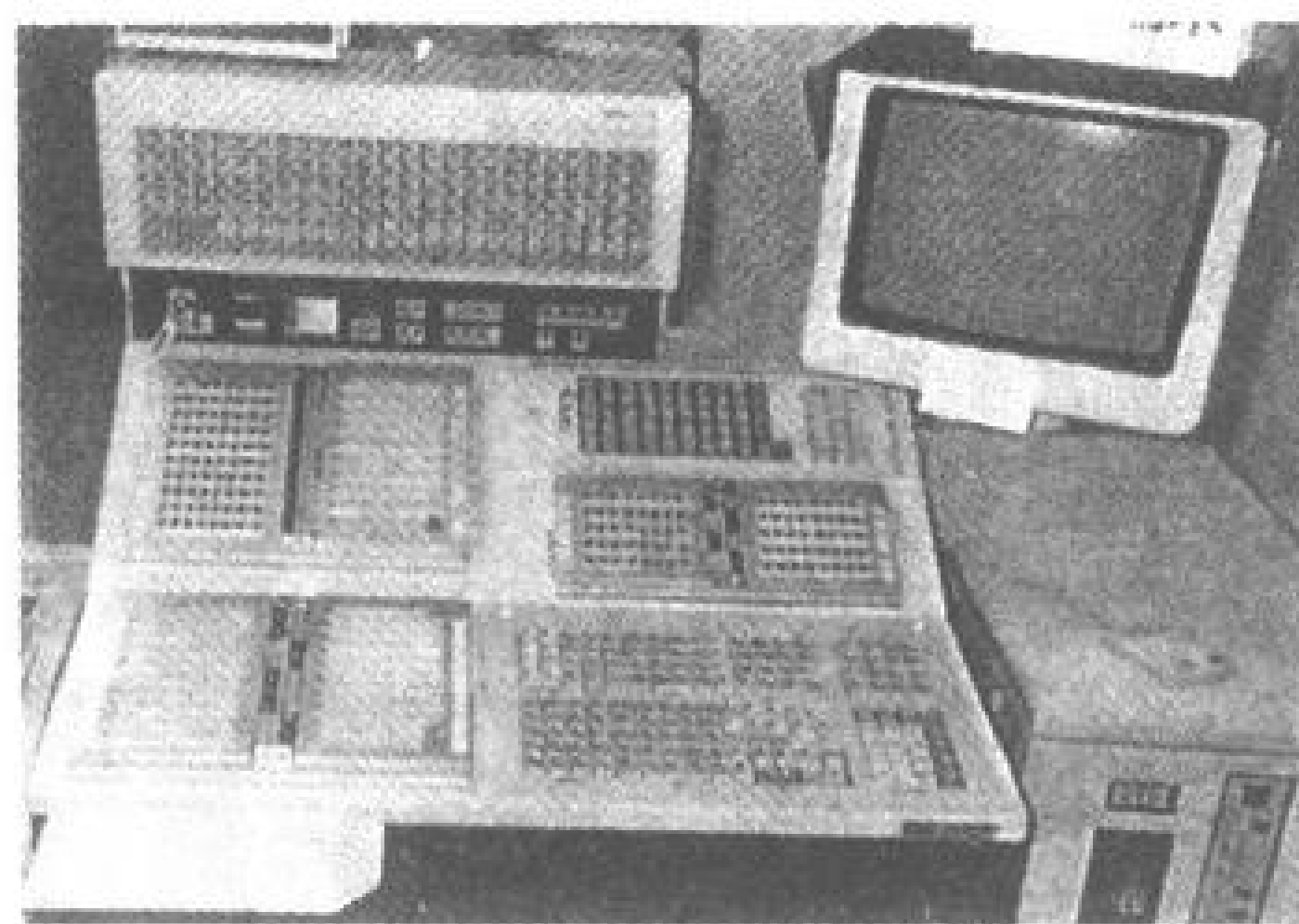


图 10.17 MARS 的终端

### ● 系统构成和处理能力

MARS 主体系统,如图 10.18 所示,是由通信控制子系统、在庫管理子系统和数据管理子系统三个子系统构成,它同时还和航空公司、旅行社、信贷公司等系统相连接。MARS 处理的 JR 列车的车票每天有 64 万张,估计到将来旅客的增加,最大具有处理 100 万张的能力。而且对于来自全国各地的订票电话可以立刻处理,具有每秒钟同时处理 130 件的能力。JR 的 MARS 系统,可以说是世界上规模最大的在线系统。

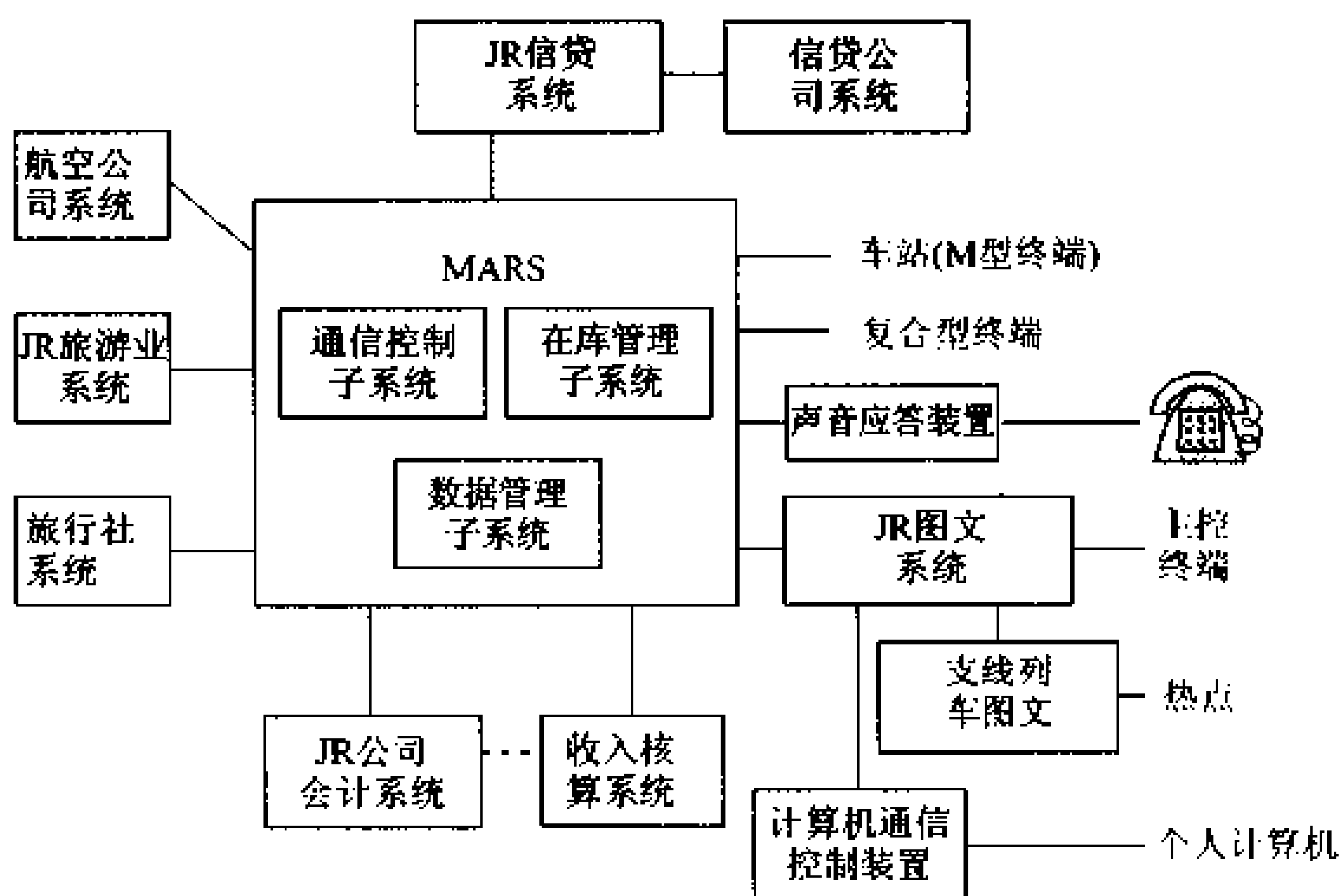


图 10.18 MARS 系统及关系网

## 8 GPS 定位

□ 要

点

要知道航海中船舶的现在位置,或者要显示汽车现在的行车位置,可通过利用人造卫星的 GPS 系统来实现。

□ 解

释

### ● GPS

GPS 是 global positioning system(全球定位系统)的字头缩写,意味着一种获知在地球上的位置的方法。利用 GPS 测定位置的方法是测量人造卫星上发出的无线电波到达地球的时间延迟,据此求出与卫星的距离,再进一步获得自己现在所处的位置。

### ● 通信卫星

依靠使用绕地球回转的人造卫星的卫星通信,我们可以得知世界各地的新闻以及根据天空云图作出的天气预报等信息。处于地球赤道上空,且其公转周期与地球自转周期相等的人造卫星,从地球上看起来就是静止的。这样的人造卫星称为静止卫星。静止卫星距离地球约 36000km,为经常保持与地球上的通信,卫星始终保持良好的状态。卫星通信所使用的无线电波,其频率在 2~31GHz 间,分配于不同国家的不同业务(图 10.19)。

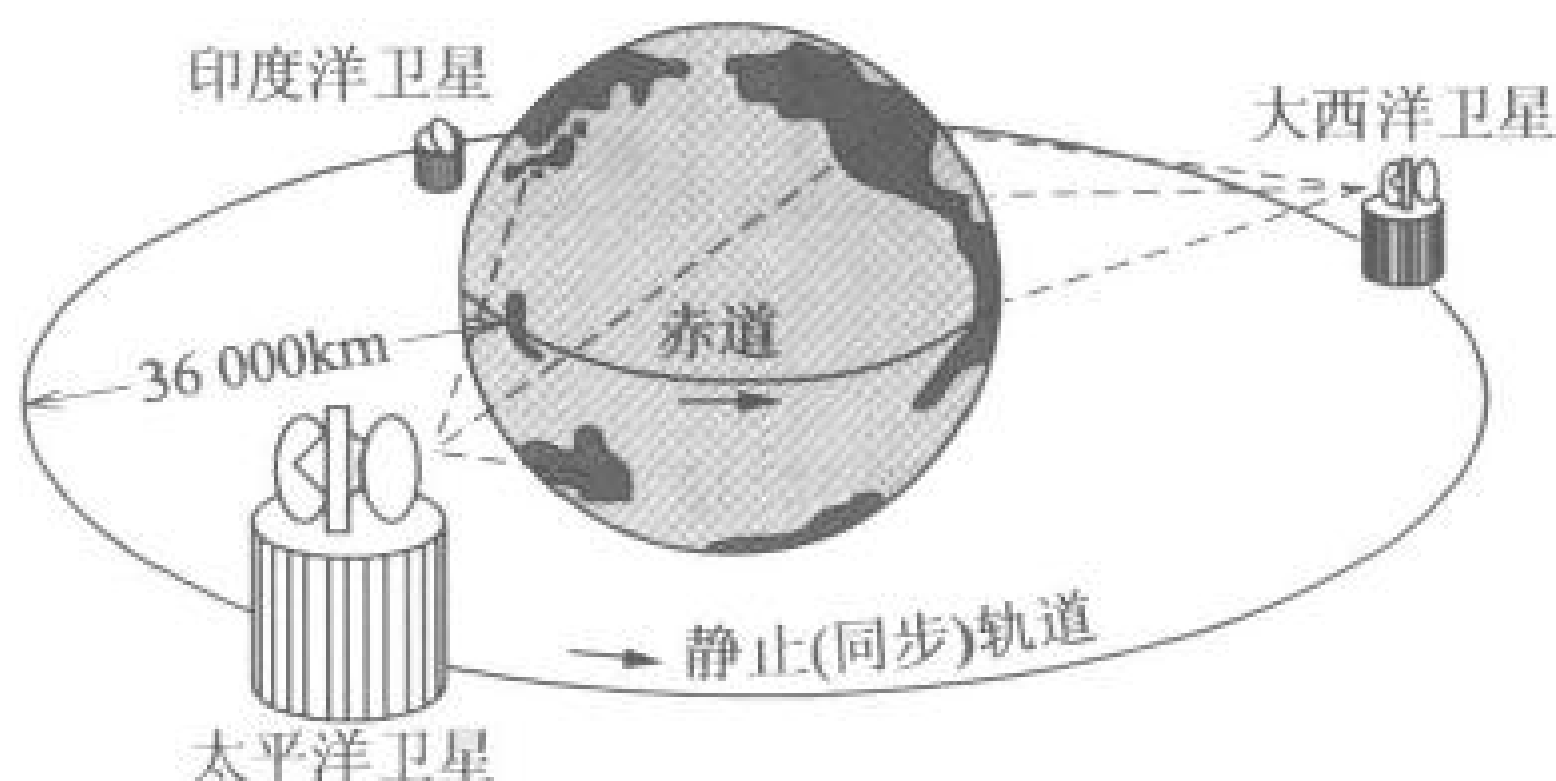


图 10.19 通信卫星

### ● GPS 定位系统

GPS 定位同时需要来自三颗人造卫星的信号。现在假设人造卫星 A 到自己的距离为  $a$ ,那自己的位置就位于以 A 为中心半径为  $a$  的球面上的某处。如果这时又知道自己离卫星 B 的距离为  $b$ ,那自己的位置就位于半径  $a$  的球和半径  $b$  的球相交的圆周上某处,于是,如果知道剩下的一个卫星 C 到自己的距离为  $c$ ,则半径

a、b、c 三球的交点即为自己的位置,自己现在位于何处即可决定。

这里,三个球的交点有两个,其中一个交点在地球外,因而不会造成错误的位置判断。这就是 GPS 定位系统的原理(图 10.20)。

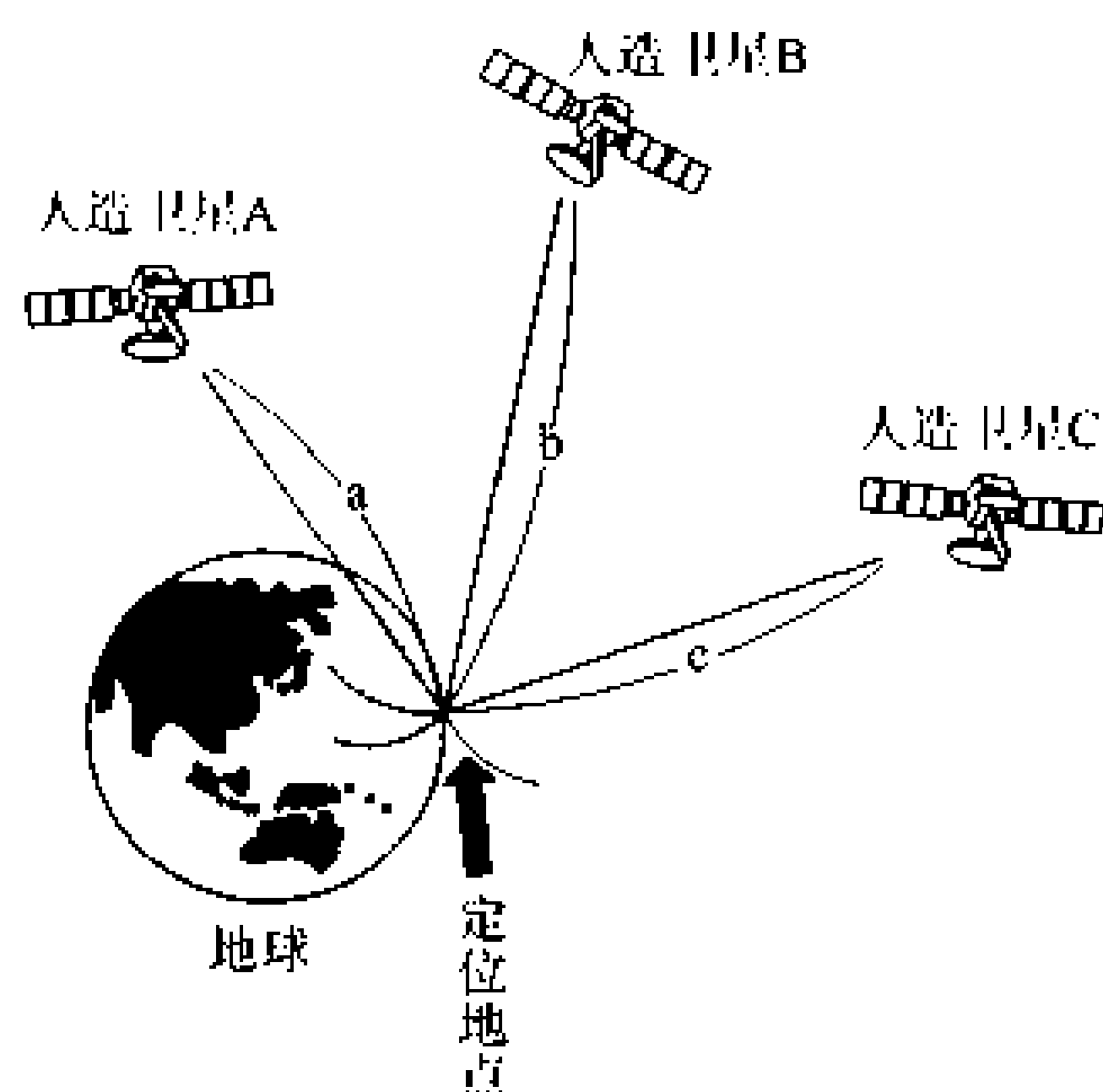


图 10.20 GPS 定位

#### NNSS

以航测系统为其初衷的 GPS,是以美国海军航测卫星系统 NNSS(navy navigation satellite system)为开端发展起来的。1964 年左右开始用于核潜艇的航测,1967 年以后进入民用。

能够利用 GPS 的运动体有船舶、汽车、飞机、直升飞机、导弹,直至个人用的所有移动体。

#### NAVSTAR

作为第 2 代的 GPS 有 NAVSTAR(navigation system with time and ranging),它是针对 NNSS 距离测量中时间间隔的测量和精度上的欠缺而开发的系统。NAVSTAR 最终由 24 个卫星的卫星群组成,复盖着全地球。

## 9 航空交通管制系统

### □ 要 点

所谓航空交通管制,是指为了航空交通的安全和秩序,对飞机的起降顺序、时间、飞行路线等给出指示,提供气象状况、地面状态等航运所必须的信息的业务。

### □ 解 释

#### ● 航空交通业务

保障飞机航运的航空交通业务是世界性的系统,其运营必须按国际统一标准实施。所以,日本的航空法规也基本上是根据ICAO(国际民用航空组织)的标准制定的。航空交通业务可以分为航空交通管制业务、飞行信息业务和紧急业务三类,其中,航空交通管制业务可以说是主要业务。其目的是在促进、维持航空交通秩序正确井然的同时,防止飞机相撞。

世界的空域,几乎全部都被指定为飞行情报区(FIR: flight information region)。而且各 FIR 的名称并不是国名,而是负责该空域的管制中心的名称。日本负责的空域有东京 FIR 和那霸 FIR(图 10.21)。东京 FIR 分为札幌管制部、东京管制部和福岡管制三部分。

在 FIR 内的空域,还有管制空域和非管制空域之分,当然管制的规则也不同。

#### 管制空域

① 管制空域 实施航空交通管制业务的空域,由管制区、管制圈、海上管制区组成。

#### 管制区

② 管制区 地上或离水面 200m 以上的空域,航线自不必说,也是飞机起降所必须管制的空域。

#### 管制圈

③ 管制圈 是机场需要的,离机场标点半径 9km、高度 900m 的空域(民用机场)。

#### 海上管制区

④ 海上管制区 原则上离海面 1700m 以上的空域。在东京和那霸由国际对空通信局负责国际航线飞机的通信业务。

管制空域内,想要以仪表方式(听从管制机关指令的飞行方式,定期航班采用此种方式)飞行的飞机,需要得到管制中心的承认,飞行中要求以管制机关的频率收听并服从其指令。管制用语言在无线电话中原则上规定使用英语。英语水平达到专门用语中心英语考试 2 级或同等程度即可。

#### ● 航空交通管制业务

航空交通管制业务,按照其负责的范围,可分类如下。

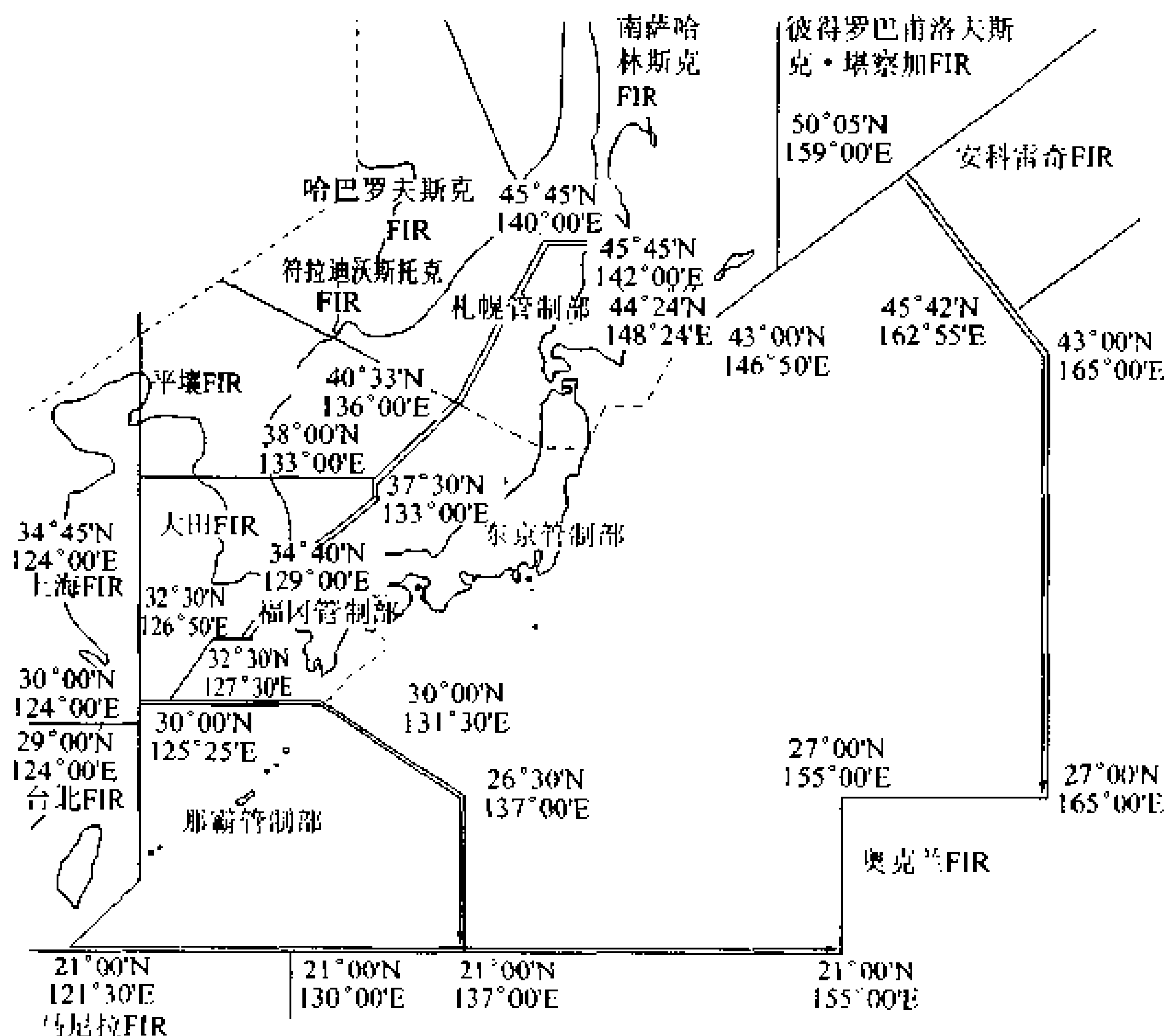


图 10.21 日本负责的飞行情报区

- 航线管制

① 航线管制 设有东京、札幌、福岡及那霸管制中心。
- 航空枢纽管制

③ 航空枢纽管制 交通繁忙的主要机场使用雷达引导飞机起降。管制塔下设有雷达室。
- 进入管制

④ 进入管制 没有雷达的机场,按照标准出入方式飞行。
- 机场管制

⑤ 机场管制 有关跑道外地上行走的管制;起降飞机的管制;来自管制中心的管制承认的中继。

在日本群岛 17 个地方设置有航线监视雷达,几乎覆盖了全部国土。国内的主要机场也有机场监视雷达,管制人员将其编组,一边看着雷达屏幕,一边进行航线、起飞跑道、降落跑道等的管制。航空管制业务的种类及其负责的空域示于图 10.22 中。

IFR

飞机以 IFR 方式(仪表飞行方式:instrument flight rules)飞行

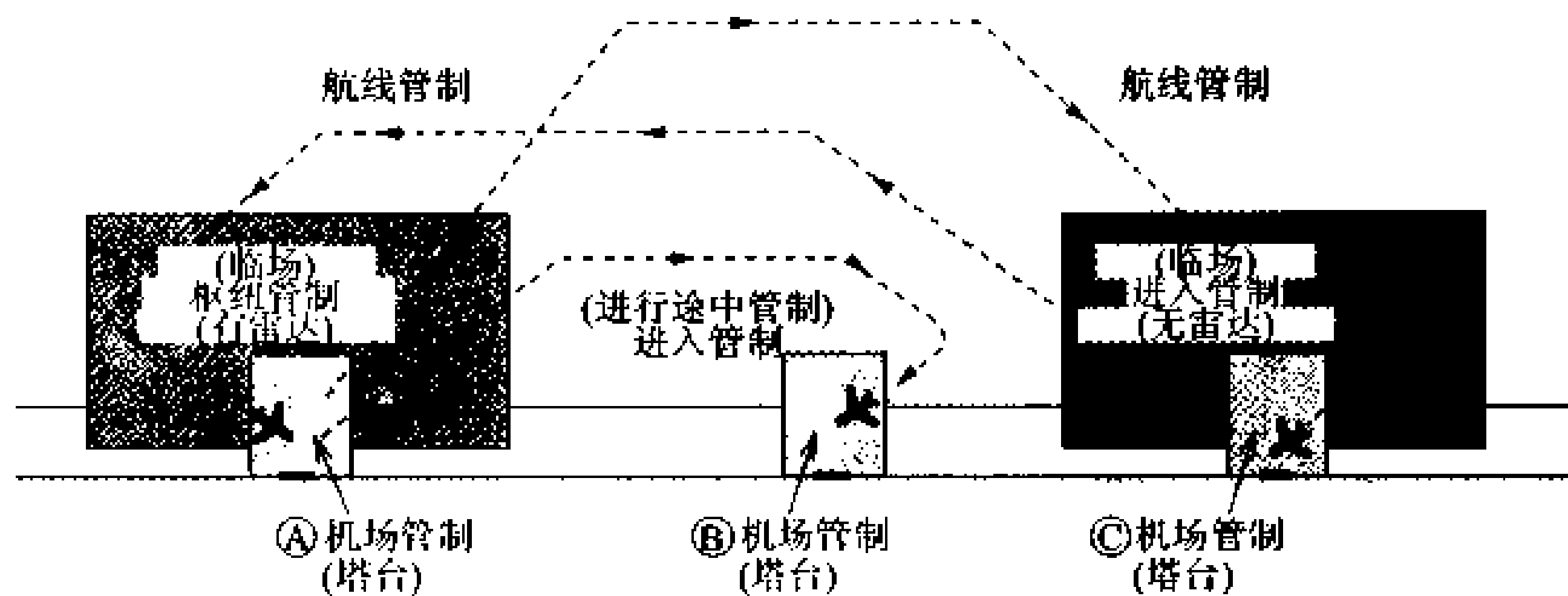


图 10.22 航空管制业务种类

时,直至从出发到目的地的飞行结束、发动机停止,其飞机一直处于管制人员的监视之中。塔台管制人员负责到飞机起飞。起飞后,到达机和出发机在空中混合飞行时,由出发管制(departure control)的管制人员负责。到达巡航高度前和在航线上飞行期间,由航线管制中心的管制人员负责。而接近目的地时,和这种起飞飞行的接力管制相反,是由管制中心的进入管制(approach control),再转向塔台(tower)管制。

# 10 身体的检测

□ 要 点

最近的医学在其进步的同时与电子技术的结合越来越深。应用电子技术的医疗机器称为医用电子仪器或简称为 ME (medical electronics) 机器。本章介绍血压计及心电图的测量使用。

□ 解 释

● 血 压

人是从心脏向全身输送血液以维持生命。为此,心脏要反复地收缩和扩张,这时从心脏送出血液的压力即为“血压”。人的血压值有一个正常的范围,血压持续高于正常值时,大脑、心脏以及肾脏等就会增加过分的负担。相反,血压过低时,血液就不能充分流遍全身,就会产生站起时头晕等症状。因此,人要注意血压应在正常值的范围内是很重要的。

● 自动血压计

医院等处使用的自动血压计是用计算机测量血压。袖布(测量时用于加压的卷在手臂上的布)的加压用电机进行,测量的方法是利用听科罗音。这个科罗音是,袖布加压时从其下的末梢侧动脉来的、与心脏跳动一致的、用听诊器能听到的声音。而且,这个声音只有在某一特定的压力范围内才能听到。发现这一现象的是20 世纪初俄罗斯的科罗托科夫,所以就用他的名字来命名。科罗音刚开始出现时的袖布压相当于人的最高血压,消失时相当于人的最低血压。图 10.23 的照片称为电子血压计,它是用麦克风收听科罗音进行血压值的判定。用摁开关的办法给袖布加压,自动测量高压和低压,并将这两个数值用数字显示方式表示出来。另外还有能够在手腕和手指上测量血压的自动血压计。

听科罗音

电子血压计



图 10.23 电子血压计(OMRON HEM-208)



## ● 心电图

### 心电图

构成人的心脏的每一个心肌细胞都会因其兴奋状态而产生活动电流,将其作为电压变化通过贴于体表的电极引出的变化波形称为心电图。其各种波都有世界通用的名称 P、Q、R、S、T(图 10.24)。

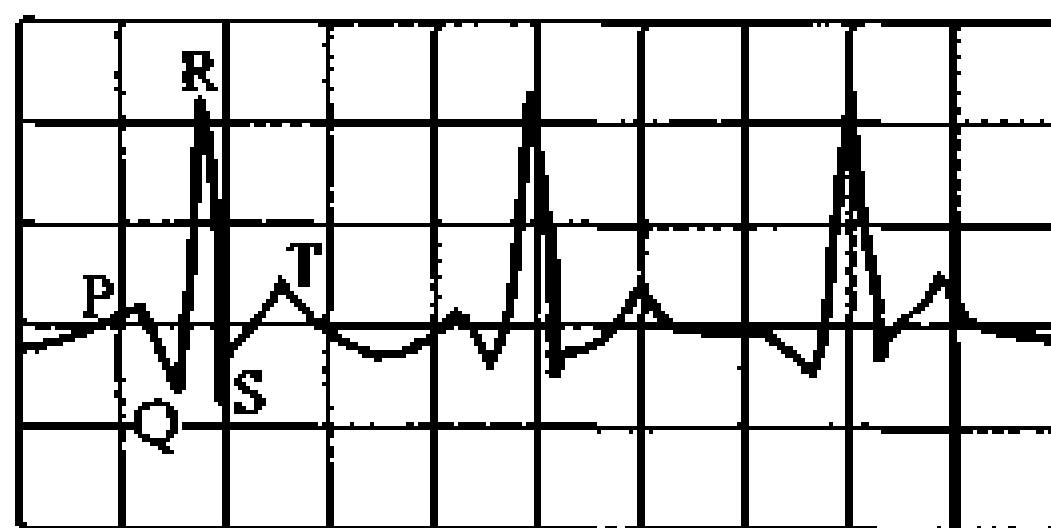


图 10.24 心电图

P 波来源于心房的收缩,Q、R、S、T 波则来自心室的收缩,因此可以从波形的形状和大小,相位的变化,各波有无出现,以及各波的相互关系获得推测心脏活动状态的线索。

心脏反复收缩和舒张变为电信号的变化,从这个意义上也可以说,人体中心脏就是一个小型发电站。电压值可以达到 1mV 到数 mV 的程度。同一被检者用同一记录法得到的心电图波形几乎总是相同的,因此,健康时的记录即是该人很好的档案资料。

最初记录人的心电图的是荷兰的阿因托霍菲(1860 年~1927 年),他确定了将电极放在两手和两足处引出心电图的方法,为现在的心电图奠定了基础。

## ● 心电图仪

通过心电图诊断心脏病的装置称为心电图仪。装在患者身体各处的电极通过引出线接到心电图仪上。图 10.25 给出了心电图仪的构成。可用选择器挑选出想要记录的两点间的电位差并将其放大。

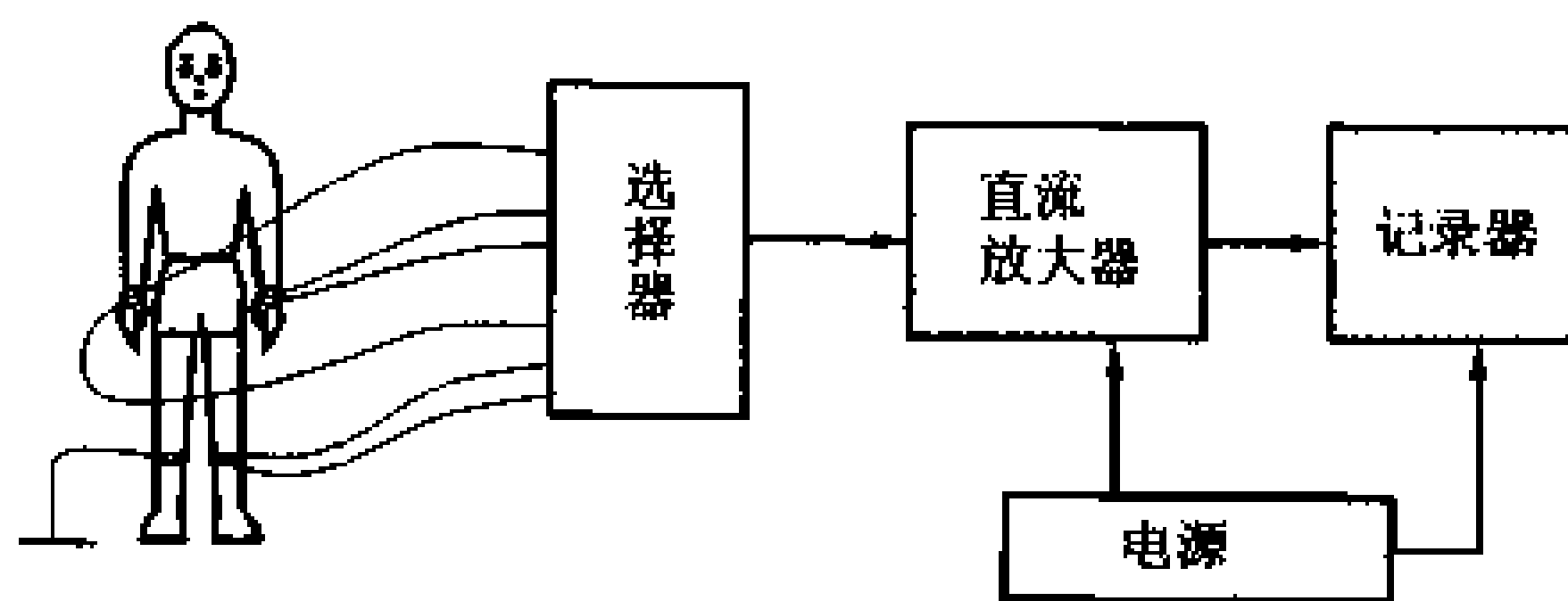


图 10.25 心电图仪的构成

心脏跳动引起的电压变化在数毫伏至数百毫伏之间,且频率很低( $0.1\sim 200\text{Hz}$ ),因此要用直流放大器。心电图的波形可以用 CRT(阴极射线管)或 LCD(液晶显示器)等显示。为了人体安全,仪器要良好接地。

## 11 X 光透视和 CT 诊断

### □ 要 点

ME 机器可以分为诊断用和治疗用。本节接着第 10 节,介绍诊断用的 X 光机、CT 扫描、核磁共振(MRI)以及超声波诊断等装置。

### □ 解 释 ● X 光机

1895 年德国人伦琴发现的伦琴射线(X 射线)穿透物质的能力很强,因此,利用此原理制造的医用装置即称为 X 光机。X 射线在电场或磁场中完全不弯曲,反射镜和棱镜等也几乎不能使其反射或折射。当初发现时因为不明其性质而起名为 X 射线。X 射线的显著特征是波长很短,因而具有不透明物质亦可穿过、人眼不可见但可使照相干版或荧光物质良好感光等性质。

#### ● X 射线管的原理

产生 X 射线的电子管,即 X 射线管的原理是,电子管的真空中高速运动的电子碰撞到阳极(对阴极)上,就会在此阳极上产生 X 射线。为了加速电子,要在管子的两端加上数十 kV~数百 kV 的高压。其产生高电压的装置大多都采用变压器。图 10.26 是 X 射发生装置的原理图,图 10.27 是装置上所用的 X 射线管,图 10.28 则是 X 射线装置。

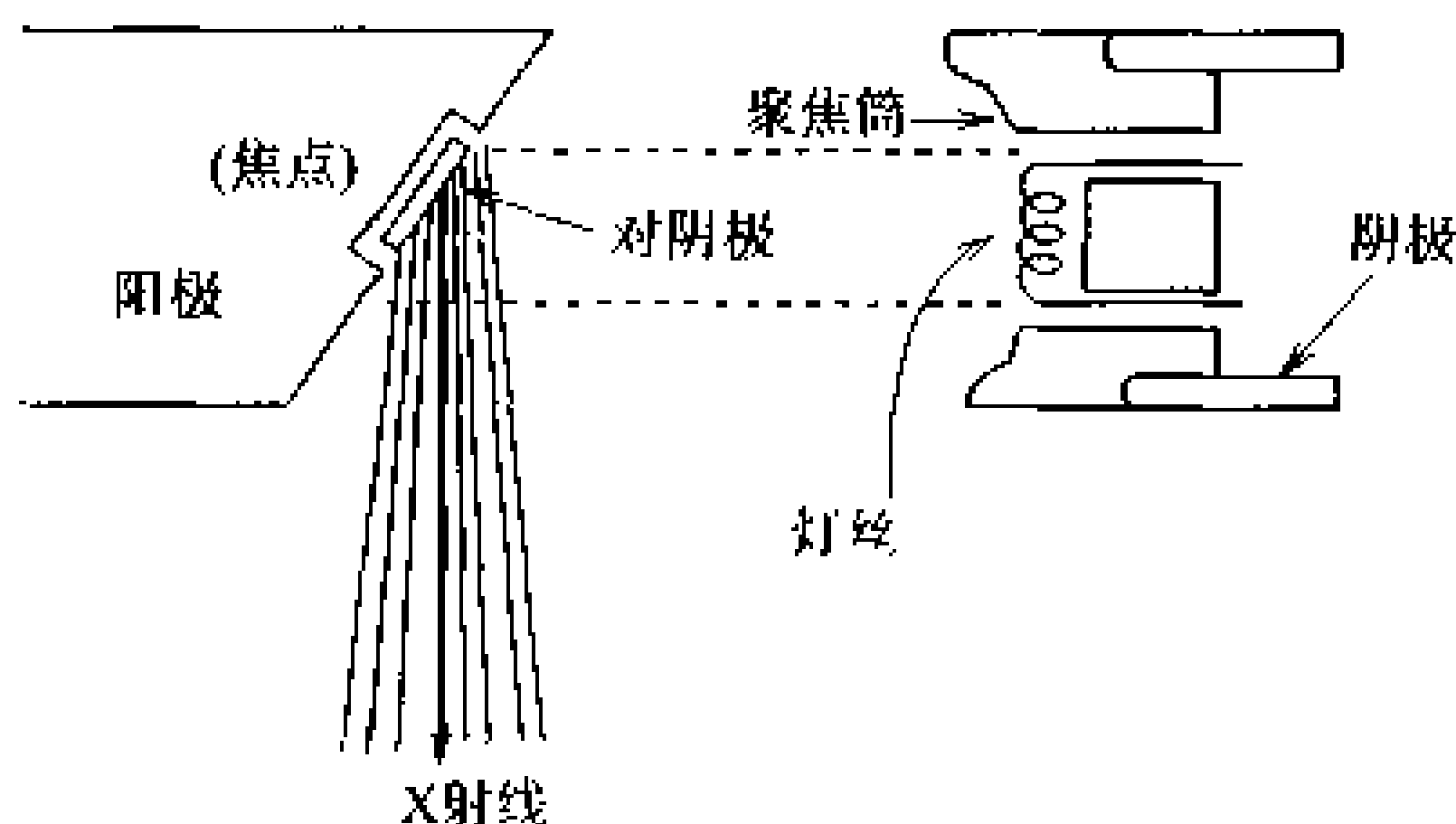


图 10.26 X 射线发生装置的原理

#### ● X 射线断层成像装置(X 线 CT)

X 线 CT(xray computed tomography)是利用 X 线的透射,得到头以及身体各部的环切断面像,从而对患病部位进行检查的装置(图 10.29)。CT 的原理是用 X 线从多个方向对人体进行照射,

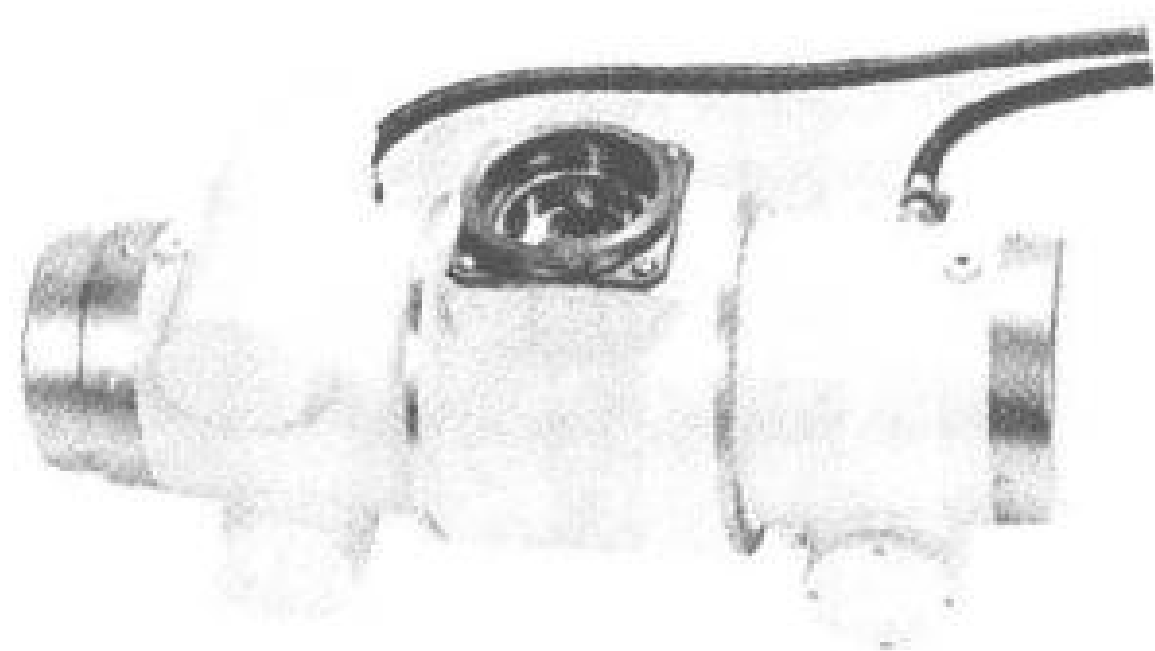


图 10.27 X 射线管装置(日立 UK-4RC-212T)

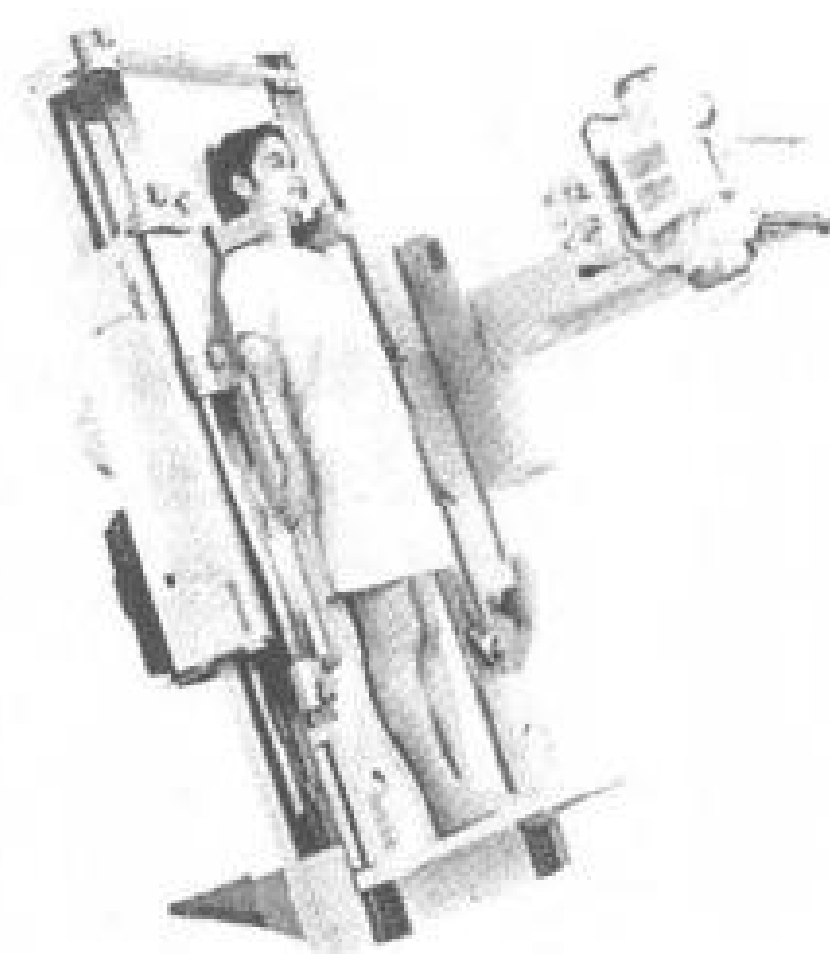


图10.28 X 射线透视装置(日立 TU-110XF)

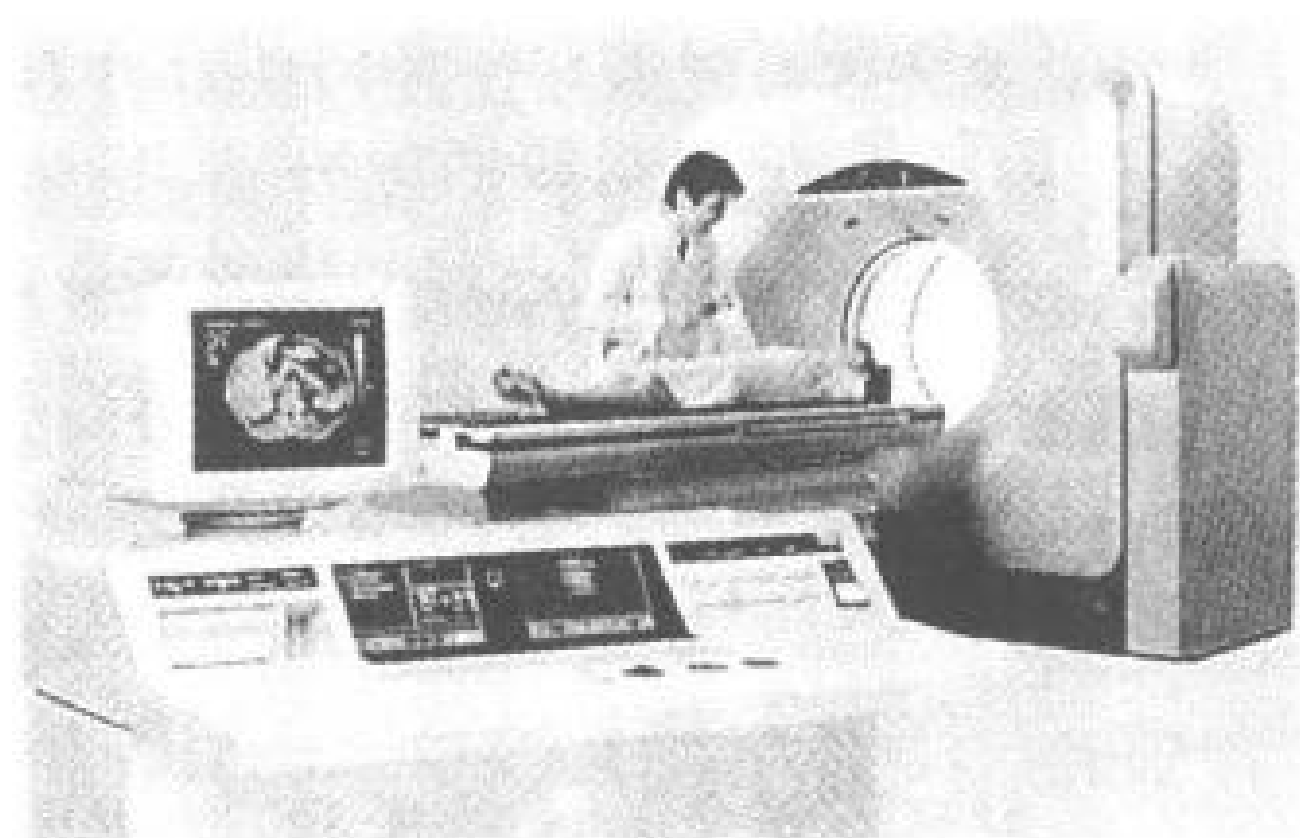


图 10.29 CT 扫描系统(日立 CT-W3000)

灵敏检出透过人体的 X 线,将透过的 X 线量的信息交由计算机处理后得到重构的断面的二维图像。其结果是将此人体断面显示于电视监视器的屏幕上。

### ● 核磁共振断层成像装置(MRI)

MRI(magnetic resonance imaging)的原理是,将人体置于强磁场中,进行特定的高频照射时,由于与高频的共振,就会从氢原子中放出电能,将此电能的分布状况图像化即可对体内组织进行诊断。与 X 射线装置相比,具有分辨力高且状态易捕捉等特点。

最近在磁场发生中使用超导磁石能够产生极强的磁场,因而除氢原子外也可以捕捉到磷、钠等原子,肌肉的一点点异常都可以检测出来。

### ● 超声波诊断装置

声音的振动频率达到 20kHz 以上时,即使有声波,我们的耳朵也听不见。频率这样高的声波称为超声波。

超声波频率提高后指向性增强,传播特性与光相同,能够按光学方式处理其反射、折射等。

超声波在人体等生物体的软组织(水分多)中的传播与在水中的传播方式一样,因而作为超声波诊断装置广泛应用于医疗领域。超声脉冲进入体内途中,碰到生物组织中对声音不均匀的地方(界面)时,就会有反射波返回,将其成像显示于 CRT 上即可用于诊断。

### ● X 线 CT 的研究展望与防护

X 线 CT 与 MRI 得失互补,在医疗诊断装置中占有重要位置,其重要性今后还会增加。X 线 CT,与 MRI 相比,有扫描(照射)时间短、经济等优点,但是也有放射危害的不利。为此,为了在 X 线放射危害很小的前提下得到分辨力很好的图像,人们期待着灵敏度更高的检测器的研究开发。

关于 X 射线的防护,从 1895 年 X 射线发现以来,经过其后的实验时代,人们已经知道铅等金属具有 X 线不易穿过的性质。据此,遮蔽能力优良的铅及其化合物常被用作 X 线防护的原材料。实用上,常常是将又薄又柔软的含铅尼龙布做成 X 线防护服,或者多层缝制做成隔断用窗帘来使用。

现在,虽说 X 线装置已经得到高度发展,无需担心装置本身会有不安全的 X 线泄漏,但是只要用它进行诊断,就不能完全避免其散射和放射危害。为此,不仅要使用防护用品,还必须遵守 X 线防护三原则:

- ① 保持距离,
- ② 短时使用,
- ③ 遮蔽正确。

这样考虑的基本根据是,X 线辐射的能量和时间成正比,而和距离的平方成反比。

### 个人手提电话

过去使用黑色电话机时的通信服务都是只有到装有电话机的地方才能利用它。随着时代的进步、商务活动范围的扩展、通信的发达,人们希望一人能够手持一台手提电话机。这就自然引起了所谓的通信个人化。个人手提电话系统 PHS(personal handyphone system)就是基于这种思想而产生的。PHS 在街上设置了许多小型天线,只要将无绳电话机的子机拿出来,就可以在车站、商店、公园等处轻松愉快地打电话接电话。

PHS 是在室内专用无绳电话的基础上发展起来的,室外也可以使用的、数字式简易手提电话系统。该系统使用的频带为 1.9GHz 带,基地局(母机)很小,天线就挂在大楼的墙壁上或放在屋顶上,电话箱如果设在地下街的天井处也能通话。PHS 发送接收使用相同的频率,属于时间错开的交互收发 TDD(time division duplex)方式。

PHS 使已往的手提电话和汽车电话等移动通信中无线电波不能到达的地下街及大楼中也能通话。可以说这就是通信个人化的最终目标。

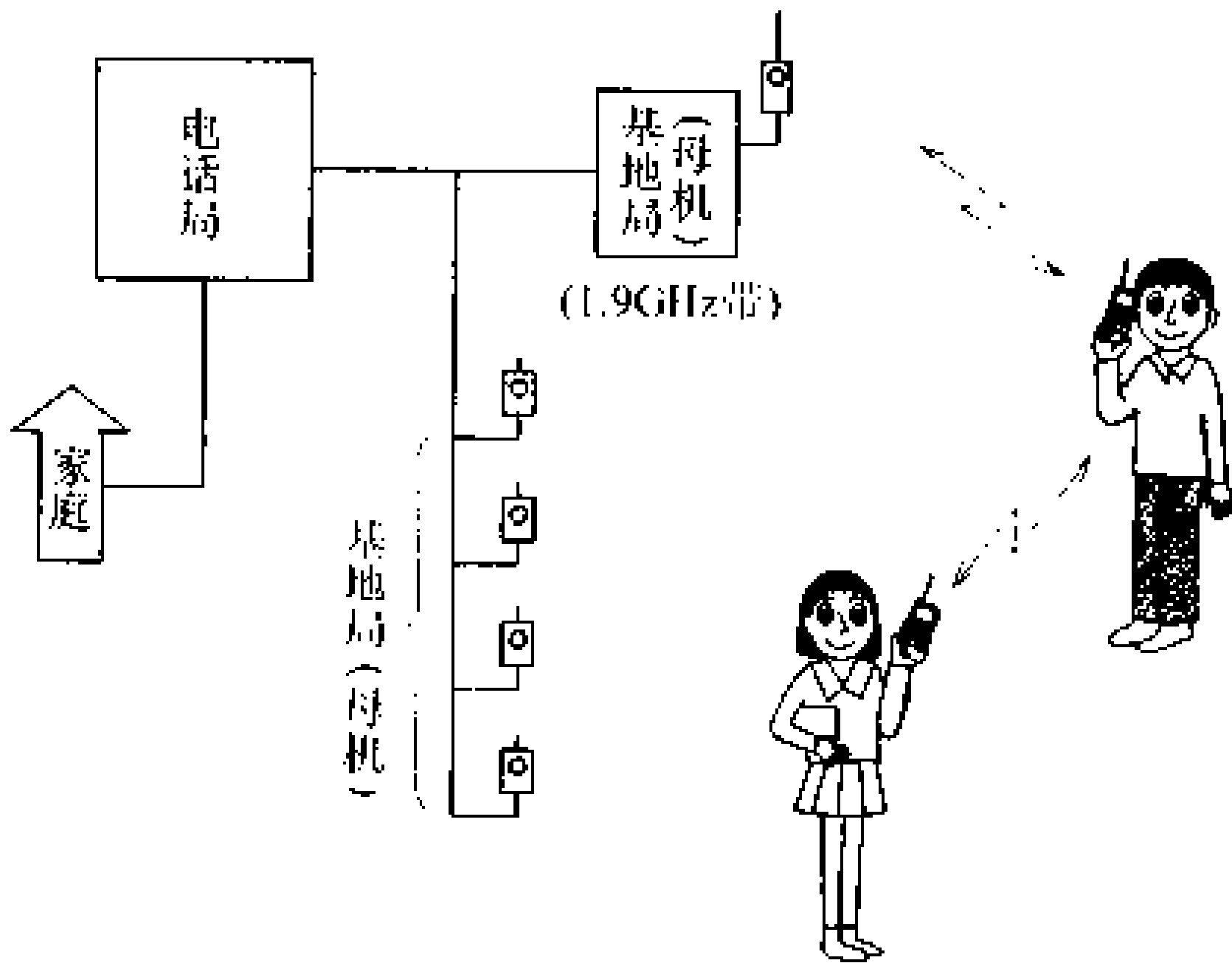


图 简易手提电话系统示意图



# 参考文献

## 1 章

大谷隆彦・雨谷昭弘・藤田 一郎:電気回路学,昭晃堂(1989)  
電気学会編:電気工学ポケットブック,オーム社(1987)

## 2 章

電気学会編:電気工学ポケットブック,オーム社(1987)  
岸野正剛:超伝導エレクトロニクスの物理,丸善(1993)  
菅 博ほか:図説電子デバイス,産業図書(1990)  
小野 周監修:現代物理学小事典,講談社(1993)  
松村源太郎訳:カリティX線回折要論,アグネ(1976)  
原島 鮮:初等量子力学,裳華房(1976)  
宇野良清ほか訳:キッテル固体物理学入門,丸善(1978)  
東京天文台編:理科年表1994年版,丸善(1993)  
伝田精一:わかる半導体セミナー,CQ出版社(1993)  
香月和男:初歩の電気物理読本,オーム社(1981)  
藤井信生:なっとくする電子回路,講談社(1994)  
福田 務ほか:絵とき電子回路,オーム社(1984)  
富田恒司:電子回路,啓学出版(1987)  
竹内 均編:Newton(ニュートン),1981年9月号ほか,教育社  
泉 弘志:半導体の仲間たち,誠文堂新光社(1994)  
中野 丈編:最新図解半導体ガイド,誠文堂新光社(1994)  
横井与次郎:リニアIC実用回路マニュアル,ラジオ技術社(1985)  
須田健二ほか:メカトロニクス入門,共立出版(1990)  
トランジスタ技術編集部:トランジスタ規格表,CQ出版社

## 3 章

佐野敏一・高木宣昭・竹内守:絵とき電子回路シリーズ②アナログ回路(I),  
オーム社(1987)  
柄本治利・真々田勝久:絵とき電子回路シリーズ③アナログ回路(II),オーム社(1987)  
白戸義男:新版アナログICの基礎,東京電機大学出版局(1993)  
トランジスタ技術編:アナログIC活用ハンドブック,CQ出版社  
トランジスタ技術,1990年7月号,CQ出版社  
トランジスタ技術,1994年11月号,CQ出版社  
小柴典居・植田佳典:トランジスタ回路入門講座③発振・変復調回路の考え方(改訂2版),オーム社(1991)



## 4 章

- 村崎憲雄訳:ディジタル回路,マグロー好学社(1982)  
 滑川敏彦・奥井重彦:通信方式,森北出版(1990)  
 オーム社編:電子学入門早わかり,オーム社(1991)  
 菅谷光雄・中村征寿:絵とき電子回路シリーズ④パルス回路,オーム社(1987)  
 清水賢資・鴻田五郎:トランジスタ回路入門講座④パルス回路の考え方  
 (改訂2版),オーム社(1991)  
 國岡昭夫:センサの上手な使い方,工業調査会(1993)

## 5 章

- 森下正志:現場の電気測定技術,オーム社(1992)  
 山口公典・小野隆彦編:やさしいFFTアナライザの使い方,オーム社(1993)  
 宇佐美 晶・曾根福保:テキストブック電子計測,日本理工学出版会(1989)  
 電気学会編:コンパクト版電気工学ポケットブック,オーム社(1990)  
 オーム社編:絵とき電子学入門早わかり(改訂版),オーム社(1991)  
 伊藤健一:アースとノイズ対策,日刊工業新聞社(1987)

## 6 章

- 日経BP社編:日経パソコン新語辞典,日経BP社(1996)  
 小市直人:絵とき情報技術基礎,オーム社(1990)  
 山口秀夫他:新版ニューメディア用語辞典,日本放送出版協会(1988)  
 浅野真次・小市直人・利根川年弘・中村征寿・森田 光:情報通信と端末技術,  
 電気通信協会(1993)  
 沖見勝也・加納貞彦・井上友二:ISDN,電気通信協会(1988)

## 7 章

- 大浜庄司:図解シーケンス制御の考え方・読み方,東京電機大学出版局  
 (1987)  
 大浜庄司:絵ときシーケンス制御読本一入門編一,オーム社(1987)  
 大浜庄司:絵ときシーケンス制御読本一実用編一,オーム社(1987)  
 見上 健,稲見正義,山崎 衛:シーケンス制御の基本,技術評論社(1975)  
 片山 徹:フィードバック制御の基礎,朝倉書店(1987)

## 8 章

- 電気学会編:電気工学ハンドブック,電気学会(1985)  
 平野達郎・緒方健二・栗林誠也:新情報ネットワークのおはなし,日本規格  
 協会(1993)  
 松田亮一・山崎真一:電話&サービス,オーム社(1989)

- 電気通信協会編:デジタル通信の基礎知識,電気通信協会(1994)  
 山崎俊雄・木本忠昭:電気の技術史,オーム社(1978)  
 平林洋志,磯上辰雄,山本 誠:標準電子技術,オーム社(1995)  
 石坂充弘:やさしい情報通信,オーム社(1988)  
 松山佐知,小林志乃:やさしいパソコン通信,オーム社(1988)  
 八木 駿:パソコン通信入門,オーム社(1989)  
 野坂邦史,村谷拓郎:新版衛星通信入門,オーム社(1994)  
 野口正一監修,都丸敬介著:図解デジタル通信機器,オーム社(1988)  
 小市直人:絵とき情報技術基礎,オーム社(1989)  
 郵政省電気通信局監修,情報通信技術研修センター編:工事担任者標準テキストアナログ第3種(I)基礎編,(II)端末技術編,オーム社(1988)  
 田中正人:最新電波法規解説,オーム社(1988)  
 江村潤郎監修,保坂岩男原著,石坂充弘著:データ通信システム入門,オーム社(1988)  
 大塚政量:上級ハムになる本,CQ出版社(1967)  
 CQ ham radio編:アンテナハンドブック,CQ出版社(1970)  
 秦 正人,山内雪路:パケット通信ハンドブック,CQ出版社(1987)  
 電気通信振興会編:第一級陸上特殊無線技士用無線工学,電気通信振興会(1989)  
 井原 昇:DX MANUAL, CQ出版社(1991)  
 原田益水:衛星のすべて,電波新聞社(1993)  
 郵政省電気通信局電波部移動通信課監修移動通信研究会編:移動通信システムガイド95、クリエイト・クルーズ(1994)

## 9 章

- 電気学会編:電気工学ハンドブック,電気学会(1985)  
 直川一也:入門カラーテレビ,東京電機大学出版局(1991)  
 家電製品協議会:ビデオとテープレコーダ,日本放送出版協会(1992)  
 中島平太郎・福田譲治:デジタルオーディオ技術,オーム社(1986)  
 村田欽哉:DCC・MDガイドブック,電波新聞社(1993)  
 中島平太郎:デジタルオーディオ読本,オーム社(1992)  
 山崎俊雄:電気の歴史,オーム社(1978)  
 電子情報通信学会編:電子情報通信ハンドブック,オーム社(1988)

## 10 章

- 電子情報通信学会編:電子情報通信ハンドブック,オーム社(1988)  
 松田亮一・山崎真一:電話&サービス,オーム社(1989)  
 電子通信協会編:デジタル通信の基礎知識,電気通信協会(1989)

- 井上伸雄:通信の最新常識,日本実業出版(1994)
- 福島一之・牧野秀雄・岩田林光監修:ハンディブック電子(旧版),オーム社(1967)
- 藤岡知夫:レーザがひらく21世紀,三田出版会(1990)
- 小林春洋:レーザのぼなし,日刊工業新聞社(1992)
- 久保田博南:健康を計る,講談社(1993)
- 福田 務:絵とき早わかり電子の知識,オーム社(1993)
- JR東日本自動改札の現状,R&M,1993年12月号,JR東日本
- 鉄道技術研究報告,1974年9月号,JR東日本
- 航空交通管制協会編著:航空管制入門,芳文社(1992)
- 日本放射線機器工業会編:医用画像・放射線機器ハンドブック,電子計測出版社(1989)
- オーム社編:図解電気の大百科,オーム社(1995)

# 索引

## 数字及英文字母词汇

10 的补数	196	D-A 转换器	225
1 的补数	195	EF 调制	469
1 个计数误差	256	E 电离层散射	407
2 的补数	195	F/B	417
2 进制码形式文件	320	FFT	284
4 进计数器	222	FFT 分析仪	284
AM(振幅调制)方式	410	FM(频率调制)方式	410
AM-DSB	413	GP-IB 接口	288
AM-SSB	413	HDLC 程序	429
ARC(自动线路控制装置)	493	IC	94
ASCII 码形式文件	320	IC 存储器	99
ASIC	96	INMARSAT	423
ATC(列车自动控制装置)	494	INS 网	484
ATO(列车自动运行装置)	494	INTELSAT	423
ATS(自动停车装置)	493	ISDN	332
A-D 转换	224	ISDN	483
A 类放大电路	128	JK-FF	217
BBS	323	LD	279
bit	187	LED	279
BS	458	LSB	189
B 类 PP 功率放大电路	128	MARS 系统	496
B 类放大电路	128	MIL 符号	200
CAD	263	MOS 型 IC	94
CCD 型摄像器件	436	MOS 型摄像器件	436
CO <sub>2</sub> 气体激光	490	MPEG	474
CRT 接口	381	MSB	189
CRT 显示器	304	NAND 电路	208
CS	458	NAVSTAR	499
CTC(列车集中控制装置)	493	NNSS	499
dBm	253	NOR 电路	208
dBV	253	n 型	73
DIP	197	n 型半导体	73
DSU(数字服务单元)	425	OK	217
		OP 放大器	98
		OSI(开放式系统间相互连接)	425
		PAM	227

PCM ..... 227  
 PGA ..... 197  
 PID 动作 ..... 373  
 PI 动作 ..... 373  
 PLA ..... 96  
 PM(相位调制)方式 ..... 410  
 pn 结 ..... 76  
 P 动作 ..... 373  
 p 型 ..... 71  
 受主能级 ..... 71  
 p 型半导体 ..... 71  
 RAM ..... 298  
 RAM ..... 99  
 ROM ..... 298  
 ROM ..... 99  
 RS-FF ..... 216  
 R-DAT ..... 471  
 SCSI 接口 ..... 383  
 SEPP 电流 ..... 464  
 SEPP 电路 ..... 128  
 SIP ..... 197  
 S-DAT ..... 471  
 TN(扭转向列)方式 ..... 439  
 TTL ..... 97  
 TTL-IC ..... 231  
 VSAT ..... 423  
 WAN ..... 326  
 XNOR 电路 ..... 210  
 XOR 电路 ..... 210  
 X-Y 绘图仪 ..... 305  
 YAG 激光 ..... 489  
 $\lambda/4$  接地天线 ..... 415

## 汉字词汇

## A

安培环路定律 ..... 7

安培右螺旋定律 ..... 7

## B

八木-宇田天线 ..... 415  
 搬运机器人 ..... 385  
 办公用计算机 ..... 301  
 半波长天线 ..... 415  
 半波整流电路 ..... 158  
 半导体激光器 ..... 101  
 半功率角 ..... 417  
 半加器 ..... 212  
 半双工通信方式 ..... 409  
 包络线检波 ..... 156  
 保 持 ..... 216  
 倍率器 ..... 33  
 倍频器 ..... 412  
 被覆层 ..... 405  
 被控量 ..... 358  
 本征半导体 ..... 69  
 比较器 ..... 224  
 比相器 ..... 232  
 笔式绘图机 ..... 263  
 毕奥-沙伐定律 ..... 7  
 边缘触发 ..... 217  
 编 程 ..... 313  
 编 码 ..... 327, 403  
 编码程序 ..... 293  
 编码器 ..... 214  
 编译程序 ..... 311  
 变址寄存器 ..... 294  
 标志寄存器 ..... 295  
 并行传输方式 ..... 424  
 并行数据 ..... 219  
 病 毒 ..... 326  
 拨号机构 ..... 394  
 拨号信号(PB 信号) ..... 396  
 玻尔半径 ..... 61

		索 引	
玻尔量子条件	61	传感器	275
薄膜晶体管	440	传输控制	429
补码器	295	串联式稳压电路	160
补 数	195	串行传输方式	424
布线逻辑控制方式	398	串行打印麻风	304
步进电机	263	串行输入数据	220
<b>C</b>		垂直极化波	416
采 样	227, 403	垂直偏转板	259
采样量化	327	垂直偏转电流	448
参数 $n$ (常数 $n$ )	118	垂直扫描	447
参征阻抗	52	垂直同步	449
残留边带振幅调制	452	纯滞后环节	363
操作量	358	磁 暴	407
测 量	238	磁场强度	12
差错检出方式	429	磁导率	10
差动联接	20	磁化曲线( $B-H$ 曲线)	21
差频现象	151	磁控管	419
长波(LF)	407	磁墨水字符阅读器	302
长度系数	18	磁盘接口	382
长冈-卢瑟福原子模型	60	磁偏转	440
常闭型	89	磁 通	9
常开型	89	磁通密度	9
超 导	104	存储部分	345
超短波(VHF)	407	存 取	99
超级计算机	301	存取时间	99
超停同步方式	426	<b>D</b>	
格外差式	412	大气波导现象	407
程序控制	361	大区方式	480
程序内藏式	293	带 宽	123
处理部件	293	带 隙	65
处理程序	308	戴维宁定理	50
处理符号	313	单边带调制	155
触 发	257	单工方式	409
触发电路	171	单极晶体管	88
传导噪声	272	单 模	405
传递函数	232	单声道广播	445

导 带	67	电容式送话器	394
导 纳	44	电视天线	269
德·摩根定理	204	电 通	26
德布罗意波	60	电通密度	26
德林格尔现象	407	电位差	25
等感曲线	433	电 压	3
等离子体显示器	304	电压反馈	125
等效长度	416	电压反馈电路	125
等效电路	52	电压反馈系数	119
等效高度	416	电压增益	253
低级语言	311	电 源	31
低频截止频率	123	电子波	60
低通滤波器	232	电子电压表	252
地区总局	398	电子枪	259
地址部分	296	电子扫描方式	462
点播电视(VOD)	487	电子束	259
电 场	3,25	电子血压计	503
电场强度	417	电子邮件	323
电场强度测量仪	269	电阻率	4
电磁波	4	叠加定理	48
电磁感应	15	动圈式仪表	243
电磁力	11	动态特性	83
电磁式	395	读带机	302
电 导	44	读卡机	302
电导率	4	端 局	398
电 荷	2	短波(HF)	407
电介质	29	对称电缆	401
电介质极化	29	对 话	310
电缆电视	458	对流层散射通信	419
电流传输特性	83	多 模	405
电流反馈	125	多输入门电路	210
电流反馈电路	125	多数载流子	73
电流反馈偏压电路	116		
电路表	243		
电 纳	44		
电偏转	441		
电桥平衡	264		
电 容	27		

E

二极管	76
二阶惯性环节	365
二阶惯性环节的频率传递函数	363

二进制数 ..... 187  
 三维图形学 ..... 475

**F**

发光二极管 ..... 79  
 发射极电阻(稳定电阻) ..... 117  
 发射极接地 ..... 84  
 发射结 ..... 81  
 法拉第定律 ..... 15  
 翻 译 ..... 310  
 翻译器 ..... 312  
 翻 转 ..... 217, 222  
 反复处理 ..... 315  
 反 馈 ..... 216  
 反馈量 ..... 124  
 反馈式稳压电路 ..... 161  
 反馈系数 ..... 124  
 反馈自动控制 ..... 359  
 反相器 ..... 208  
 反向恢复特性 ..... 168  
 反转层 ..... 92  
 范 式 ..... 206  
 方 波 ..... 166  
 方块图 ..... 358  
 仿真器 ..... 312  
 非加载 ..... 346  
 非模块化 ..... 321  
 非扫描式 ..... 280  
 非正弦交流电 ..... 35  
 非自力控制 ..... 361  
 费米-狄拉克的分布函数 ..... 68  
 费米能级 ..... 67, 69  
 费米能量 ..... 67  
 费用存储(SF)磁卡 ..... 495  
 费用存储系统 ..... 495  
 分贝[dB] ..... 273  
 分辨率 ..... 491

分布参数电路 ..... 52, 400  
 分 局 ..... 398  
 分流器 ..... 33  
 分频电路 ..... 230  
 分时处理 ..... 308  
 分压电阻 ..... 116  
 分组交换 ..... 428  
 峰 值 ..... 253  
 峰值(p型)电子电压表 ..... 253  
 弗莱明右手定律 ..... 16  
 弗莱明左手定则 ..... 11  
 浮动小数点表示 ..... 194  
 辐射测热 ..... 267  
 辐射噪声 ..... 272  
 负反馈 ..... 136  
 负逻辑 ..... 201  
 负钳位电路 ..... 181  
 负 载 ..... 31  
 负载线 ..... 112  
 复 数 ..... 39  
 复位状态 ..... 216  
 副扫描 ..... 462  
 傅里叶变换 ..... 283

**G**

感 抗 ..... 41  
 感应电桥型(差动变压器) ..... 344  
 高画质电视(EDTV) ..... 455  
 高级语言 ..... 311  
 高阶惯性环节 ..... 363  
 高 频 ..... 249  
 高频截止频率 ..... 123  
 高频振荡型 ..... 344  
 高清晰度电视(HDTV) ..... 455  
 高输入阻抗电路 ..... 126  
 高速并行接口 ..... 382  
 高效编码 ..... 474



隔行扫描	448
个人用计算机	301
跟踪控制	361
工作点	112
工作速度	96
功率传感器	268
功率放大器	412
功率增益	253
共用电视系统	269
沟 道	89
固定长度记录	321
固定电荷	76
固定偏压电路	115
固定小数点表示	194
固体激光	488
关闭时间	170
管制空域	500
管制区	500
管制圈	500
光	278
光 笔	302
光标阅读器	302
光电导型摄像管	436
光电二极管	79
光功率表	279
光检测器	469
光 缆	278, 401
光学式字符阅读器	302
硅	61
过渡现象	54
过渡响应	360

## H

海上管制区	500
航空交通管制业务	500
航空枢纽管制	501
航线管制	501

耗尽层	76
耗尽型	89
和动联接	20
恒值控制	361
后续型	98
互 感	19
互感系数	19
环路方式	325
环路增益	124
环形计数器	223
回扫时间	449
汇编程序	311
汇编语言	311

## J

击穿电压	78
机场管制	501
机器语言	311
基本程序	429
基带传输方式	427
基极接地	85
基极接地直流电流放大系数	109
激 光	488
激光打印机	304
激活区域	101
即时地址指定	297
集成度	95, 96
集电极的断路电流	84
集电极功率损耗	87
集电结	81
加反向偏压	78
加 载	346
加正向偏压	78
夹断电压	90
家庭地址登记局	482
价电子带	67
假数基数	194

间接地址指定 .....	297	可变长度记录 .....	321
兼容性正交调幅方式(摩托罗拉方式) .....	446	客户-服务器式 .....	326
检波(再生)中继方式 .....	419	空 穴 .....	67
键 盘 .....	302	控制部件 .....	292
键盘接口 .....	381	控制程序 .....	308
交互式 .....	473	控制系统 .....	358
交流电 .....	35	控制信号 .....	358
交流负载线 .....	123	控制装置 .....	358
交流偏置记录方式 .....	466	库仑定律 .....	23
焦耳定律 .....	5	快速傅里叶变换 .....	284
焦耳热 .....	5	快速性 .....	373
阶跃输入 .....	360	扩散电流 .....	70
阶跃响应 .....	360		
接 线 .....	323		
截 底 .....	180		
截 顶 .....	180		
解 调 .....	227		
解 码 .....	327		
解释翻译程序 .....	311		
介电常数 .....	26		
金刚石结构 .....	63		
进入管制 .....	501		
进行比较 .....	225		
近程控制 .....	361		
禁 带 .....	65		
晶 格 .....	63		
晶格缺陷 .....	63		
晶格振动 .....	70		
晶 体 .....	63		
晶体振荡器 .....	230		
静 电 .....	23		
静电电容型 .....	344		
静电能 .....	29		
静电式绘图机 .....	263		
静态特性 .....	83		

## K

开启时间 .....

169

## M

脉冲编码调制 .....

227

门控功能	257
门 限	202
门限电平	175
面心立方晶格	63
模块化	321
模块化系数	321
模拟量	238
模拟器	312
模拟式	257
模拟通信	391

N

奈奎斯特采样定理	229
奈奎斯特频率	229
奈奎斯特稳定	376
内电阻	6
能 带	65
能带结构	65
能 级	61

O

欧姆定律	5,32
耦合电容器	122

P

判别法	376
判断符号	313
旁路电容器	122
抛物面天线	415
泡利不相容原理	65
喷墨式打印机	304
喷墨式绘图机	263
批处理	308
偏 压	76
偏 转	440

漂移电流	69
频分多路复用	402,418
频分多址联接	422
频 率	36,255
频率合成器	233
频率鉴别器	414
频谱分析	280
平方律检波	156,414
平衡法(零位法)	265
平均值	36
平均值检波	156

Q

齐纳二极管	79
其它符号	314
旗脉冲同步方式	403
气体激光	488
迁移率	3
前置放大器	463
钳位电路	181
强磁性体	22
权 重	187
全波整流电路	158
全加器	213
缺陷	67

R

热电偶	249
热电式电流表	249
热电型红外传感器	276
热敏记录	462
热式打印机	304
容 抗	42

S

三极管开关	169
-------	-----

三维图形学 .....	475	输出输入转换部分 .....	345
扫 描 .....	447	输出特性 .....	83
扫描电子显微镜 .....	491	输入部分 .....	345
扫描式 .....	280	输入输出符号 .....	313
扫描线 .....	447	输入特性 .....	83
上行线路 .....	421	输入以及输出部件 .....	293
少数载流子 .....	72	输入阻抗 .....	119
少数载流子存储效应 .....	168	鼠 标 .....	302
栅 极 .....	88	数据传输速度 .....	426
栅极接地电路 .....	133	数据通信 .....	392
舍尾误差 .....	194	数据信号速度 .....	426
甚短波(UHF) .....	407	数值数据 .....	318
生成程序 .....	311	数字量 .....	238
声 压 .....	432	数字脉冲 .....	230
声压级 .....	433	数字式 .....	257
剩 磁 .....	465	数字数据交换网 .....	427
剩余阻抗 .....	250	数字通信 .....	391
施密特触发电路 .....	171,255	双工方式 .....	409
施 主 .....	73	双极晶体管 .....	80
施主能级 .....	73	水平极化波 .....	416
时分变换 .....	399	水平偏转板 .....	259
时分多路复用 .....	403,418	水平偏转电流 .....	448
时分多址联接 .....	422	水平扫描 .....	447
时间常数 .....	54,178,363	水平同步 .....	449
时序图 .....	220	顺序存取文件 .....	321
时钟输入端 .....	217	瞬时值 .....	35
实 部 .....	39	伺服电机 .....	262
实时处理 .....	308	伺服机构 .....	361
始末端符号连线箭头 .....	313	算 法 .....	293
示波器 .....	280	算术逻辑运算部件 .....	292
势 垒 .....	76	损耗特性 .....	278
势垒电压 .....	76	锁相式 .....	257
视觉机器人 .....	385		
手动控制 .....	359		
受 主 .....	71		
输 出 .....	346		
输出部分 .....	345		
输出导纳 .....	119		

## T

调 幅 .....	153
调谐式高频放大电路 .....	130
调 制 .....	227

调制度	154
调制解调器	425
调制器	412
调制速度	426
调制系数	154,413
特征频率	130
梯形图	346
条形码	302
听科罗音	503
通话机构	394
通信协议	425
通用计算机	301
通用宽带放大电路	130
同 步	426,449
同步信号	447
同或电路	210
同轴电缆	401
透射电子显微镜	491
图像扫描仪	302
图像信号	450
图像信号电流	462
图形输入板	302

W

外部设备	293
外差中继方式	419
外来干扰	359
万用表	243
网上聊天	324
网同步方式	403
微 波	407
位移电流	4
文氏图	204
纹波系数	160
稳定化光源	278
稳 态	54,360
稳态误差	360

稳 压	171
无电源中继方式	419
无线电回路控制局	481
无线电基地局	481
无线通信	390
无源电路	49
无源器件	49
物理记录	321
物质波	60
误 差	238
误码率	428

X

细 胞	487
下行线路	421
衔铁型	344
线路交换(DOX-C)	428
线性检波	414
相对磁导率	10
相对介电常数	26
相 干	488
相 位	37
相位差	37
相位裕度法	376
消侧音电路	396
消耗功率	96
小区方式	480
小信号电流放大系数	108,119
校正法	130
谐振频率	45
心电图	504
芯 线	405
信号电平表	269
信号电压 S	273
信息的包	427
星形方式	325
行波管	420

行式(宽行)打印机 ..... 304  
 行走机器人 ..... 386  
 修正法 ..... 265  
 虚 部 ..... 39  
 虚拟短路 ..... 135  
 选择处理 ..... 315  
 寻 址 ..... 99  
 循环始末端符号 ..... 314

## Y

压电式 ..... 395  
 压控振荡器 ..... 232  
 延时功能 ..... 219  
 阳 极 ..... 78  
 摇臂机器人 ..... 385  
 液晶显示 ..... 439  
 液晶显示器 ..... 304  
 一对一式 ..... 326  
 一阶滞后环节的频率传递函数 ..... 362  
 移动电话交换局 ..... 482  
 移位功能 ..... 219  
 移位寄存器 ..... 219, 295  
 移像型摄像管 ..... 436  
 异 或 ..... 210  
 异质结 ..... 101  
 译码器 ..... 99, 214  
 阴 极 ..... 78  
 音 频 ..... 249  
 有线通信 ..... 390  
 有效扫描线长度 ..... 449  
 有效扫描线数 ..... 449  
 有效值 ..... 36  
 有源器件 ..... 49  
 诱发发光 ..... 102  
 与 或 ..... 346  
 预售票系统 ..... 392  
 阈 值 ..... 168, 175

阈值电压 ..... 92  
 原始型 ..... 98  
 圆极化波 ..... 416  
 源 极 ..... 88  
 源接地 ..... 132  
 约瑟夫逊效应 ..... 104  
 约瑟夫逊元件 ..... 105  
 允 带 ..... 65  
 运算放大器 ..... 98, 134  
 运算控制器 ..... 345

## Z

杂散电感 ..... 250  
 杂散电容 ..... 267  
 杂质半导体 ..... 71  
 载 波 ..... 227  
 载波通信 ..... 402  
 载流子 ..... 69  
 再 生 ..... 100  
 暂稳压 ..... 171  
 噪声测量仪 ..... 285  
 噪声电压 N ..... 273  
 噪声指数 NF ..... 273  
 增强型 FET ..... 92  
 增强型 IC ..... 94  
 增强型 ..... 89  
 增 益 ..... 120, 417  
 增益常数 ..... 363  
 增益特性 ..... 369  
 增益裕度法 ..... 376  
 涨落现象 ..... 407  
 掌上计算机 ..... 301  
 真值表 ..... 199  
 振荡器 ..... 412  
 振幅调制 ..... 227  
 振铃机构 ..... 394  
 整 流 ..... 78

正反馈	143	主存储部件	292
正规化	194	主放大器	463
正逻辑	201	主控室	442
正钳位电路	181	主扫描	462
正弦交流电	35	注入载流子	76
正向恢复特性	168	驻极体式	395
帧间相关编码	474	转折频率	370
直接存取文件	321	自动平衡电位差计	262
直接地址指定	296	自 感	17
直接高频放大式	412	自感系数	17
直接中继方式	419	自力控制	361
直流电	31	自偏压电路	116
直流电流放大系数	85	自由电子	67
直流偏置记录方式	466	自由振荡频率	138
直线检波	156	字处理器	301
指令部分	296	字符数据	318
指令地址寄存器	294	字 节	187
指令寄存器	294	总 局	398
指令译码器	295	总线方式	325
指 数	194	阻 抗	42
指数表示	194	阻抗匹配	53
置位状态	216	阻塞状态	217
中波(MF)	407	最大额定值	78
中和电容器	131	最大可听值	433
中频放大电路	131	最密堆积六方晶格	63
中央处理器	293	最外层轨道	62
周 期	36	最小可听值	433
周期性振荡	375		

本书中出现的主要单位

物 理 量	单 位	单位符号	备 注
电流	安[培]	A	
电荷电量	库[仑]	C	$1C=1A \cdot s$
电场强度	伏·米 <sup>-1</sup>	V/m	
电位、电位差(电压)	伏	V	$1V=1W/A$
电动势			
电位移	库[仑]·米 <sup>-2</sup>	C/m <sup>2</sup>	
电通量,电位移通量	库[仑]	C	
静电电容	法[拉]	F	$1F=1C/A$
电容			
介电常数	法[拉]·米 <sup>-1</sup>	F/m	
电偶极矩	库[仑]·米	C·m	
电流密度	安[培]·米 <sup>-2</sup>	A/m <sup>2</sup>	
电流线密度	安[培]·米 <sup>-1</sup>	A/m	
磁场强度	安[培]·米 <sup>-1</sup>	A/m	
磁位差	安[培]	A	
磁通密度,磁感应	特[斯拉]	T	$1T=1Vs \cdot m^2$
磁通(量)	韦[伯]	Wb	$1Wb=1V \cdot s$
磁向量势	韦[伯]·米 <sup>-1</sup>	Wb/m	
自感	亨[利]	H	$1H=1V \cdot s/A$
互感			
导磁率	亨[利]·米 <sup>-1</sup>	H/m	
磁化	安[培]·米 <sup>-1</sup>	A/m	
磁极化	特[斯拉]	T	
电阻	欧[姆]	Ω	$1Ω=1V/A$
电导	西[门子]	S	$1S=1A/V=Ω^{-1}$
电阻率	欧[姆]·米	Ω·m	
电导率	西[门子]·米 <sup>-1</sup>	S/m	
磁导率	亨[利]	H	
阻抗,阻抗系数	欧[姆]	Ω	
电抗			
导纳,导纳系数	西[门子]	S	
电纳			
有效功率	瓦[特]	W	
波长	米	m	
频率	赫[兹]	Hz	$1Hz=1s^{-1}$



[ G e n e r a l   I n f o r m a t i o n ]

书名=电子实用手册

作者= B E X P

S S 号=

加密地址=

页数= 5 2 7

下载位置= h t t p : / / 2 0 2 . 1 1 8 . 1 8 0 . 1 2 1 / e b o o k / s j y 0  
1 / d i s k h d / h d 4 1 / 1 3 / ! 0 0 0 0 1 . p d g